



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

División de Ciencias Sociales y Humanidades

Doctorado en Ciencias Económicas

Tesis:

Cambio climático, economía y entropía: una propuesta socioecológica de integración para la transición energética del sector eléctrico de México

Tesis que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias Económicas

Presenta

Mtro. Gabriel Alberto Rosas Sánchez

Matrícula: 2181801250

rosassanchezgabriel@gmail.com

Asesora: Dra. Georgina Alenka Guzmán Chávez

Jurado

Presidenta: Dra. Graciela Carrillo González

Secretario: Alejandro José López Feldman

Vocal: Dr. Alejandro Dávila Flores

Vocal: Dra. Georgina Alenka Guzmán Chávez

Iztapalapa, Ciudad de México. México a 31 de mayo del 2024

Agradecimientos

Esta tesis se ha desarrollado gracias, en primer lugar, al apoyo de la Dra. Alenka Guzmán. Sus contribuciones, debates y seguimiento puntual permitieron lograr los objetivos de la tesis. Su profesionalismo son ejemplos para mi desarrollo académico. Mi reconocimiento y agradecimiento al Dr. Frédéric Amblard quien asesoró el desarrollo del modelo empírico de simulaciones del capítulo 5. La estancia de investigación en el Équipe Système Multi-Agent Coopératifs (SMAC) del Institut de Recherche en Informatique (IRIT), Université Toulouse 1 Capitole, Francia me ayudó a fortalecer los conocimientos necesarios para efectuar un ejercicio empírico apropiado. Además, fue una oportunidad para adentrarme en la cultura francesa.

Agradezco a la Dra. Graciela Carrillo, Dr. Alejandro López Feldman y Dr. Alejandro Dávila sus acertados comentarios a la tesis. Advierto que cualquier error es responsabilidad mía. Mi gratitud al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (antes CONACYT), por el otorgamiento de la beca mensual para el desarrollo de la tesis. La culminación de la misma se logra en los plazos, tiempo y forma convenidos al inicio del contrato.

El camino fue menos duro por el apoyo incondicional de mis amigos y familia. Esta tesis la dedico a mis padres y hermana, Gabriel Rosas Zavala, Susana Sánchez Soyet y Guadalupe Rosas. Su inspiración, apoyo y cobijo es fundamental para mi vida. Finalmente, quiero dedicar mi esfuerzo, mi presente y futuro a mi prometida Nichte-Ha quien aceptó ser mi compañera de vida y le ha dado un motivo a mis días. Gracias por estar en los días y derrochar tu polvo enamorado. Nuestras metas compartidas comienzan a dar frutos. El camino junto a ti siempre será mejor.

Durante mi estancia de tesis doctoral puede efectuar la escritura de 8 artículos científicos, 21 artículos de divulgación, 42gggg conferencias nacionales e internacionales, 4 cursos a nivel licenciatura. Me integré a las siguientes redes de investigación y sociedad civil: la International Society for Ecological Economics capítulo Mesoamérica y el Caribe, el Pacto Socioambiental en la Friedrich Ebert Stiftung representación México. Recientemente ser invitado a las mesas de debate “Temas claves para diseñar e implementar una política de desarrollo productivo sostenible en México” en la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Retribución social

Se trata de una tesis innovadora en el análisis del sector eléctrico desde la economía. El objetivo principal es comprender los impactos económicos, energéticos y sociales del actual estado del Sector Eléctrico de México (SEM) y las consecuencias del proceso de transición energética en este mismo conjunto de variables a la luz de la dinámica internacional. Uno de los resultados principales es el potencial de los instrumentos de gobernanza en la operación del SEM, particularmente, el orden de mérito (merit-order).

Asimismo, se destaca el potencial de la generación distribuida como un espacio relevante para democratizar la energía pues permite a pequeños colectivos, productores y comunidades hacerse cargo de la generación de electricidad. La tesis propone la necesidad de una tarifa FIT, es decir, una tarifa de conexión que incentive a los pequeños productores a participar en el gran mercado eléctrico nacional. Ambos instrumentos impulsan la generación de energías renovables, particularmente eólica y fotovoltaica, al tiempo que tienen implicaciones sobre el precio al consumidor, emisiones contaminantes y define una nueva estructura colaborativa Estado-sector privado-comunidades para la adecuada gobernanza del sector.

La tesis logra su cometido pues se inserta en un conjunto de discusiones alrededor del SEM. Por un lado, su papel estratégico en la vida social y económica a través del servicio eléctrico. Por otro, el retorno de la política industrial y las políticas de desarrollo productivo sostenible ponen al centro la relevancia del sector eléctrico al considerarse de uno de los mayores generadores de emisiones de efecto invernadero y se trata además del servicio energético con mayores perspectivas de crecimiento hacia una economía electrificada a nivel mundial.

En un contexto de cambio climático, la tesis propone un marco teórico novedoso para comprender la transición energética como un fenómeno sistémico y de largo plazo, en el cual existen ganadores y perdedores por la constitución de un nuevo paradigma energético. Así, la tesis se suma en la discusión teórica, empírica y de recomendaciones de política pública para el escenario inevitable que representa la transición energética en México. Las propuestas de la tesis incorporan la perspectiva de justicia social de la transición. Finalmente, la propuesta teórica, el modelo del cual derivan las recomendaciones de política, modelo basado en agentes, intenta incorporar la dinámica económica energética y social del SEM de manera realista, innovadora en la literatura y poco abordado para el caso mexicano.

Cambio climático, economía y entropía: una propuesta socio ecológica de integración para la transición energética del sector eléctrico de México

Resumen

El objetivo de la tesis es proponer un marco teórico novedoso para el análisis de la transición energética del sector eléctrico de México (SEM), desde una perspectiva sociotécnica, frente a la incorporación y desarrollo de las energías renovables en un contexto de cambio climático. Se plantea como hipótesis que la trayectoria actual del SEM se encuentra lejos de un sendero de sustentabilidad, por lo cual, es relevante el papel del marco institucional y medidas de gobernanza para la expansión regulada de la generación eléctrica renovable. Con base en los datos disponible en la CRE y el CENACE sobre precios, generación, emisiones de CO₂, capacidad instalada, demanda y oferta de electricidad se calcula la generación entrópica del SEM como medida de sustentabilidad. Complementariamente, se desarrolla un modelo de simulación computacional, modelo basado en agentes, para evaluar el impacto del orden de mérito (merit-order) en la proveeduría de electricidad en el mercado mayorista y la dinámica del Feed-in-Tariff en la generación eléctrica distribuida.

Palabras clave: Sector eléctrico de México, Modelo basado en agentes, transición energética.

Climate Change, Economy, and Entropy: A Socio-Ecological Integration Proposal for the Energy Transition in the Mexican Electricity Sector

Abstract

The main objective of this doctoral thesis is to propose a theoretical framework for the analysis of the energy transition of the Mexican Electricity Sector (MES), from a socio-technical perspective, against the incorporation and development of renewable energies in a context of climate change. The hypothesis is that the current trajectory of the MES is far from a path of sustainability, therefore, the role of the institutional framework and governance measures for the regulated expansion of renewable electricity generation are relevant. With the available data from the CRE and CENACE on prices, generation, CO₂ emissions, installed capacity, electricity demand and supply, the entropic generation of the MES is calculated as a measure of sustainability. Complementarily, a computational simulation model (agent-based model) is developed to evaluate the impact of the merit order in the supply of electricity in the wholesale market and the Feed-in-Tariff dynamics in decentralized electricity generation.

Keywords: Mexican Electricity Sector, Agent-based model, energy transition.

Índice

Introducción general	17
<i>Capítulo 1. Pensamiento económico y cambio climático: una relación compleja</i>	30
Introducción	31
<i>1.1 El papel de la naturaleza en el pensamiento económico clásico</i>	
1.1.1 El medio ambiente finito y la idea mercantilista	34
1.1.2 Naturaleza: la fuente de valor de la economía. La perspectiva fisiócrata	35
1.1.3 ¿Abundancia de recursos naturales?: La economía clásica	37
1.1.4 La naturaleza marginal del equilibrio general: los marginalistas	39
<i>1.2 La formalización de la naturaleza en los modelos neoclásicos</i>	<i>40</i>
1.2.1 Cambio climático y desarrollo sustentable	43
1.2.2 Medio ambiente y equilibrio general computable	44
1.2.3 Consumo energético, emisiones y crecimiento económico	46
1.2.4 Regulación ambiental, competitividad e innovación	47
1.2.5 Impuestos ambientales	49
1.2.6 Contabilidad ambiental	50
<i>1.3 Nuevos aportes teóricos: la economía ecológica</i>	<i>52</i>
1.3.1 Decrecimiento	57
1.3.2 Metabolismo social y sistema socioecológico	59
1.3.3 Movimientos sociales, justicia y ética ambiental	60
1.3.4 Economía ecológica de los pobres y economía ecológica radical	62
1.3.5 Desarrollo sustentable y ecología industrial	64
1.3.6 Termodinámica, entropía y bioeconomía	66
Reflexiones finales	69
Biografía	73
<i>Capítulo 2. Hacia una propuesta de integración de la economía, ecología, sociedad y entropía: el Modelo Multinivel Bioevolutivo para el análisis de la transición sociotécnica</i>	82
Introducción	83
2.1 El mundo de Georgescu-Roegen: entropía y procesos económicos	86

2.1.1	¿A que nos referimos con termodinámica y entropía?	86
2.1.1.1	Entropía y sus distintas conceptualizaciones	89
2.1.2	Termodinámica y proceso económico	91
2.1.2.1	Primera ley de termodinámica: el mito energético	91
2.1.2.2	Segunda ley de termodinámica: el arribo de Georgescu-Roegen	93
2.1.3	Irreversibilidad de los procesos económicos y ciclos ecológicos	94
2.2	Sistemas Complejos y economía evolutiva: integración de la entropía al espacio de interacciones	
2.2.1	Sistemas cerrados vs sistemas abiertos	96
2.2.2	Economía evolutiva como enfoque integrador	97
2.2.3	Escala macro, meso y micro	101
2.2.4	Homo Œconomicus Sapiens frente al individualismo metodológico	103
2.2.5	Reglas, hábitos, rutinas e instituciones	105
2.2.6	La respuesta creativa del sistema frente al cambio climático: una perspectiva de innovación desde un enfoque evolutivo y complejo	108
2.2.6.1	Agentes	110
2.2.6.2	Dinámica	110
2.2.6.3	Redes	110
2.2.6.4	Tiempo	111
2.2.6.5	Evolución	112
2.2.6.6	Emergencia	113
2.2.7	Internalización del problema medioambiental	114
2.2.7.1	Efectos de la entropía a escala macro	114
2.2.7.2	Internalización simultánea meso-micro	117
2.2.7.3	El Estado como actor relevante para internalizar el problema ecológico	119
2.2.7.4	Incidencia de los actores sobre la evolución, cambio, adaptación institucional y creación endógena de respuestas	120
2.2.7.5	Proceso de adquisición de conocimiento de las empresas y creación de tecnologías físicas	121

2.2.7.6 Mecanismo evolutivo en las tecnologías físicas y sociales	123
2.2.7.7 Innovación y difusión tecnológica como resultado endógeno emergente sujeto al desempeño energético y aceptación social; desarrollo de nichos y transformación del paradigma sociotécnico	126
2.2.8 De la innovación endógena a la transición energética	128
2.2.8.1 Algunos modelos para analizar la transición	128
2.2.8.2 Modelo de Gestión de la Transición (Transition Management Model)	130
2.2.8.3 Enfoque multipatrón (Multi-Pattern Approach)	132
2.2.8.4 Sistema de Innovación Tecnológica (Technological Innovation Systems)	134
2.2.8.5 Modelo Multinivel (Multilevel analysis)	136
2.2.8.5.1 Críticas al modelo multinivel	139
2.2.8.6 Hacia una microfundamentación del modelo multinivel: el Modelo Multinivel Bioevolutivo	140
2.2.9 Taxonomía de la transición con base al Modelo Multinivel Evolutivo	140
2.2.9.1 Transición eléctrica comunitaria de ida y vuelta.	145
2.2.9.2 Transición eléctrica de gobernanza amplificada	147
2.2.9.3 Transición eléctrica de descentralización variada	149
2.2.9.4 Transición eléctrica de régimen y paisaje condicionado	151
2.2.9.5 Desenvolvimiento entrópico y dinámica de la taxonomía	153
<i>Bibliografía</i>	155
<i>Capítulo 3. La transición energética internacional</i>	165
Introducción	166
3.1. De las grandes transiciones energéticas a la problemática ambiental	167
3.1.1 Del fuego al petróleo: características de las grandes transiciones	167
3.1.2. Abuso de los combustibles fósiles, globalización y crisis climática	170
3.1.3 Energías renovables: la última transición	178
3.2 La urgencia de la transición energética en el siglo XXI	183
3.2.1 Los principales acuerdos en materia ambiental y el desarrollo sustentable	183
3.2.2 La importancia de la transición energética sociotécnica	187

3.2.3 El carácter entrópico de la transición	193
3.3 El papel del sector eléctrico en la transición: historia y actualidad	196
3.3.1 La energía eléctrica. ¿fuente secundaria de energía?	196
3.3.2 Primera etapa: dependencia de los fósiles	199
3.3.3 Segunda etapa: La tendencia internacional hacia las energías renovables	202
3.4 La tendencia internacional hacia las energías renovables	204
3.4.1 Costos	204
3.4.2 Capacidad instalada	205
3.4.3 Difusión de la innovación: gasto en I+D	206
3.4.4 Patentes	207
3.5 La transición energética en el sector eléctrico internacional	210
3.5.1 Experiencias internacionales	210
3.6. Experiencia internacional de la transición sociotécnica: Una mirada desde el Modelo Multinivel Evolutivo	212
3.6.1 China	212
3.6.2 India	218
3.6.3 Reino Unido	223
3.6.4 Alemania	229
3.6.5 Estados Unidos	235
3.7 Taxonomía de la transición: límites, barreras y lecciones para México hacia la producción renovable	242
<i>Bibliografía</i>	245
<i>Capítulo 4. El paradigma eléctrico en México: análisis de los determinantes de la transición sociotécnica y su desempeño bioeconómico</i>	256
Introducción	257
4.1 Análisis de la transición sociotécnica del Sector Eléctrico de México a través del Modelo Multinivel Bioevolutivo	258
4.1.1 Importancia y contribución sectorial del SEM	258
4.1.2. Retos actuales y futuros del SEM en el contexto internacional	261
4.1.3 Inicios de la industria nacional hasta la institucionalización de la electricidad:	

1880-1937	264
4.1.4 Segunda etapa: Institucionalización y desarrollo: 1937-1992	270
4.1.5. El origen de la transformación sociotécnica: 1992-2013	277
4.1.6 ¿Consolidación de las energías renovables en el SEM? Resultados y actualidad desde la Reforma del 2013	282
4.1.6.1 Despliegue de energías renovables	287
4.1.6.2. Generación distribuida	290
4.1.6.3 Conflictos de la transición	295
4.1.7 Una reflexión general sobre la transición sociotécnica del SEM de largo plazo	298
4.2. La bioeconomía del sector eléctrico de México: el desempeño entrópico de la transición	302
4.2.1 Arquitectura general del SEM	302
4.2.2 Desempeño energético del SEM	304
4.2.2.1 Centrales públicas	304
4.2.2.2 Centrales de Autogeneración	306
4.2.2.3 Centrales Productores Independientes de Energía (PIE)	307
4.2.2.4 Emisiones contaminantes	308
4.2.3. Relevancia económica del SEM	311
4.2.3.1 Valor bruto de la producción	311
4.2.3.2 Precios medios por sector y tarifas	313
4.2.4 Evaluación entrópica del SEM	313
Bibliografía	315
<i>Capítulo 5. el futuro del sector eléctrico de México: una propuesta de simulación empírica de la transición sociotécnica</i>	317
Introducción	318
5.1. Modelos Basados en Agentes: una alternativa para modelar un mundo complejo, evolutivo y bioeconómico	320
5.1.1 La importancia de la teoría del equilibrio para la economía	320
5.1.1.1 Equilibrio general computable	322
5.1.1.2 Equilibrio general dinámico estocástico	324

5.1.1.3 Límites y deficiencias del enfoque de los modelos de EGC y EGDE	325
5.2 Modelos Basados en Agentes: una alternativa	326
5.2.1 Naturaleza del modelado basado en agentes	326
5.2.2 Anatomía de los Modelos Basados en Agentes	329
5.2.3 Ventajas y límites de la modelación basada en agentes: simulación vs predicción	331
5.2.4. Importancia de la validación empírica en lo MBA	334
5.3. MBA y sus aplicaciones para la transición socioecológica	335
5.3.1 Importancia de una perspectiva compleja, evolutiva y bioeconomía de la transición a través de MBA	335
5.3.2 Algunas aplicaciones de MBA para analizar transiciones energéticas	337
5.4 Una propuesta de simulación para el proceso de transición socioambiental del sector eléctrico mexicano	340
5.4.1 La transición socioambiental es un resultado emergente	340
5.4.2 Capas del modelo	343
5.4.3 Descripción y características del modelo	344
5.5 Modelo matemático	349
5.5.1 Entorno de interacciones	350
5.5.2 Diagramas de flujo sobre las fases de la simulación	350
5. 6. Detalle de los métodos	352
5.4.6.1 Pronóstico de la oferta	352
5.4.6.2 Pronóstico de los precios	353
5.4.6.3 Determinación del costo de producción e ingreso esperados	353
5.4.6.4 Formación del precio de la CENACE bajo el criterio marginalista	353
5.4.6.5 Regla de decisión sobre producir o no	354
5.4.6.6 Determinación del precio final en el mercado y la oferta horaria	354
5.4.6.7 Medición nivel de emisiones CO2 y nivel de entropía	354
5.4.6.8 Decisión de invertir o no en I+D	354
5.4.6.9 Cálculo del orden de mérito	356
5.4.6.10 Implementación de Feed-in Tariff	357
5.4.6.11 Parámetros	359

5.7. Resultados de la simulación	359
5.7.1 Condiciones iniciales del modelo	359
5.7.2. Diferencia entre criterio marginalista y orden de mérito	362
5.7.3 Costos de generación y demanda de electricidad	364
5.7.4 Evolución del precio bajo el criterio marginalista y orden de mérito	365
5.7.5 Evolución de las emisiones de CO2 y generación entrópica	370
5.7.6 El papel de la reacción creativa y adaptativa	375
5.7.7 La dinámica de la generación distribuida	376
Bibliografía	378
Conclusiones	381
Anexo I	393
Anexo II	397
Anexo III	399

Tabla de acrónimos

°C: grados centígrados

CAT: Construcción-Arrendamiento-Transferencia

CENACE: Centro Nacional de Control de Energía

CFE: Comisión Federal de Electricidad

CNH: Comisión Nacional de Hidrocarburos

CO: Construcción-Operación

COP: Conferencia de las Partes

COT: Construcción-Operación-Transferencia

CRE: Comisión Reguladora de Energía

ECO2: Emisiones de Dióxido de Carbono

EGC: Equilibrio General Computable

FIT: Feed-in tariff

GD: Generación distribuida

GWh: Giga watt por hora

KWh: Kilowatt por hora

LEI: Ley de la Industria Eléctrica

LyFC: Luz y Fuerza del Centro

MBA: Modelos basados en agentes

MMB: Modelo Multinivel Bioevolutivo

MWh: Mega watt por hora

ODS: Objetivo de Desarrollo Sostenible

PEMEX: Petróleos Mexicanos

PIB: Producto Interno Bruto

PIBpc: Producto Interno Bruto Per Cápita

PIE: Productores Independientes de Energía

PJ: Petajoules

PRODESEN: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional

SE: Secretaria de Economía

SENER: Secretaria de Energía

Equivalencias

1 PJ= 277,778 MWh

1 GW= 1000 MW

1 MW= 1000 kW

Índice de Cuadros

	pp.
Cuadro 2.1	90
Cuadro 2.2	99
Cuadro 2.3	100
Cuadro 2.4	109
Cuadro 3.1	180
Cuadro 3.2	188
Cuadro 3.3	193
Cuadro 3.4	200
Cuadro 3.5	203
Cuadro 3.6	231
Cuadro 3.7	243
Cuadro 4.1	296
Cuadro 4.2	298
Cuadro 4.3	308
Cuadro 5.1	327
Cuadro 5.2	333
Cuadro 5.3.	349
Cuadro 5.4	367

Índice de gráficas	pp.
Gráfica 3.1	174
Gráfica 3.2	175
Gráfica 3.3	176
Gráfica 3.4	176
Gráfica 3.5	202
Gráfica 3.6	203
Gráfica 3.7	205
Gráfica 3.8	207
Gráfica 3.9	208
Gráfica 3.10	208
Gráfica 3.11	208
Gráfica 3.12	209
Gráfica 3.13	209
Gráfica 3.14	209
Gráfica 3.15	210
Gráfica 3.16	210
Gráfica 3.17	211
Gráfica 3.18	211
Gráfica 3.19	211
Gráfica 4.1	258
Gráfica 4.2	260
Gráfica 4.3	261
Gráfica 4.4	288
Gráfica 4.5	289
Gráfica 4.6	289
Gráfica 4.7	290
Gráfica 4.8	292
Gráfica 4.9	293

Gráfica 4.10	294
Gráfica 4.11	294
Gráfica 4.12	304
Gráfica 4.13	305
Gráfica 4.14	307
Gráfica 4.15	307
Gráfica 4.16	310
Gráfica 4.17	310
Gráfica 4.18	310
Gráfica 4.19	310
Gráfica 4.20	311
Gráfica 4.21	312
Gráfica 4.22	313
Gráfica 4.23	314
Gráfica 5.1	366
Gráfica 5.2	366
Gráfica 5.3	367
Gráfica 5.4	367
Gráfica 5.5	367
Gráfica 5.6	368
Gráfica 5.7	368
Gráfica 5.8	368
Gráfica 5.9	369
Gráfica 5.10	369
Gráfica 5.11	369
Gráfica 5.12	370
Gráfica 5.13	371
Gráfica 5.14	372
Gráfica 3.15	372
Gráfica 3.16	372
Gráfica 3.17	373
Gráfica 3.18	373

Gráfica 3.19	373
Gráfica 3.20	374
Gráfica 3.21	374
Gráfica 3.22	374
Gráfica 3.23	375
Gráfica 3.24	375
Gráfica 3.25	377
Gráfica 3.26	378

Introducción general

El planeta sufre la peor crisis energética y climática en su historia. De acuerdo con Balzani (2019) sólo en 2018 a nivel mundial se quemaron por segundo 250 toneladas de carbón, 1140 barriles de petróleo y 102,220 metros cúbicos de gas, equivalentes a 11,074 toneladas de dióxido de carbono, generando emisiones contaminantes nunca vistas en 3 millones de años. Asimismo, el informe del Internacional Panel of Climate Change (IPCC)¹ publicado en marzo del 2023, es la prueba científica contundente de la responsabilidad humana sobre los cambios químicos, climáticos y meteorológicos del planeta a causa de los patrones de consumo y producción. El grave deterioro está llevando a la humanidad a replantearse sus prácticas cotidianas, al tiempo que la comunidad científica y académica incursionan en discusiones y nuevos proyectos que abonen al desarrollo de los mecanismos apropiados hacia este fin.

Teniendo en cuenta la situación de urgencia, la mayor parte de los gobiernos en el mundo consideran vital el establecimiento de acuerdos colaborativos que permita regular las actividades contaminantes y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de evitar el incremento de la temperatura global más allá del umbral de 1.5°C-2°C.

Durante la última década del siglo anterior con la Cumbre de Rio en 1992, el Protocolo de Kioto 1997, y más recientemente, el Acuerdo de París de 2015 y el Acuerdo de Escazú, las naciones firmantes han buscado establecer un mínimo de acciones en materia ambiental conciliar la dinámica económica, social y ecológica bajo la idea del desarrollo sustentable. Los principales instrumentos para lograr esta meta consideran pertinente lo siguiente: i) creación de mercados de carbono; ii) sistemas de compensación ambiental; iii) sanciones arancelarias; iv) agricultura sustentable; v) transporte ecológico; vi) disminución pobreza rural; vii) distribución justa del ingreso; viii) eficiencia energética; ix) innovación, entre otros (Bárcena *et al*, 2020). Simultáneamente, en 2015 la Organización de Naciones Unidas convocó a la cumbre sobre el desarrollo sustentable en donde se presentó la agenda de 17 objetivos y 169 metas en busca de proteger el planeta, combatir la pobreza, preservar la biodiversidad, entre otros.

Frente a la dependencia de las energías fósiles por parte de la estructura productiva, durante los últimos años ha surgido una fuerte crítica al estilo de desarrollo basado en la explotación masiva de los bienes naturales. Así, una de las medidas que ha logrado el consenso

¹ Disponible en <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

internacional en la búsqueda de una transformación energética es la transición de la matriz energética hacia energías renovables, principalmente el viento y el sol.

El desplazamiento de las sociedades hacia otras fuentes energéticas no es un fenómeno nuevo. De acuerdo con Jiménez (2020) se han presentado al menos 4 grandes momentos en la historia. La primera revolución energética se caracterizó por el uso intensivo del carbón, posteriormente el petróleo protagonizó la segunda revolución hasta la década de 1970 donde se integró el gas natural y dio paso a la tercera revolución. En conjunto, estas tres fuentes energéticas consolidaron una estructura social dominada por los combustibles fósiles. El inicio del siglo XXI orientó el interés de las energías primarias, agua, viento, sol, geotérmica, biomasa, hidrógeno y E-fuels² como fuentes potenciales capaces confrontar al régimen energético vigente y brindar posibles escenarios alternativos para el desarrollo económico y social.

La discursiva dominante sobre el desarrollo sustentable basado en la difusión de las energías renovables asienta su optimismo sobre el progreso tecnológico y la innovación en tecnologías renovables orientado la métrica de sustentabilidad hacia la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (ECO₂). Sin embargo, desde la teoría económica, esta visión acerca de la tecnología como la fuente de esperanza de la humanidad carece de elementos sólidos en su interpretación, causalidad, relación e implementación, aspectos que pueden afectar fuertemente su efectividad y convierten al concepto de desarrollo sustentable, en una idea con frágiles soportes difícil de alcanzar.

En primer lugar, la visión imperante en los principales acuerdos internacionales contra el cambio climático establece una relación lineal positiva con la tecnología, asumiendo que, al darse la innovación técnica, se logra un círculo virtuoso de forma automática en el espacio social y ambiental³. Dentro del excesivo optimismo, se piensa que la tecnología y el conocimiento pueden fungir como sustitutos permanentes de la energía (Ehrlich *et al.* 1999), permitiendo el

² Viscardi *et al.* (2021) señala que las E-fuels como un concepto amplio. Se refiere a las tecnologías que transforman cualquier tipo de desperdicio proveniente de fuentes alternativas en combustibles electrónicos. Estas nuevas fuentes garantizan mayores niveles de eficiencia en cualquier sistema energética. El más famoso es el hidrógeno que apunta ser insumo tanto en la industria eléctrica y automotriz.

³ A partir del modelo canónico de Solow (1953) donde la caída de la productividad factorial, el crecimiento poblacional, el capital por trabajador y la depreciación del capital puede contrarrestarse con el impulso del “progreso técnico”, esta conjetura se trasladó a los modelos de inspiración neoclásica para abordar el problema de las externalidades ambientales.

desarrollo sin restricciones de la producción de bienes y circulación del capital, dejando de lado las consecuencias energéticas y materiales de la actividad económica.

En segundo lugar, la reducción mecanicista del análisis energético-económico-social, la simplificación del análisis de la innovación y la falta de consideración de balances energéticos se han trasladado al abordaje teórico dentro del análisis económico tradicional. Efectivamente, la teoría neoclásica que sustenta la economía ambiental reduce el problema ecológico a una externalidad que reduce el bienestar de la sociedad. Si bien existe un interés por reducir el impacto negativo de las externalidades sobre la eficiencia económica⁴, medir sus consecuencias sobre el excedente del productor/consumidor y crear esquema de valorización de los servicios ambientales, el esquema epistemológico⁵ de la economía ambiental es bastante limitado.

Desde esta perspectiva, los problemas ambientales se reducen a una solución estrictamente de mercado o a partir de acuerdos entre privados bajo la visión del Estado mínimo en la economía tal como establece el teorema de Coase⁶. Con ello, existe una determinación del sistema económico sobre el resto de los sistemas. La dinámica y temporalidad que causa un fenómeno como el cambio climático se estandarizan estrictamente al tiempo económico y tecnológico, desdibujando la dinámica estructural a nivel sistémico y entre sistemas. Los límites epistemológicos de la economía ambiental se transmiten en el diseño de la política económica y ambiental.

Un elemento crucial en el debate es la ausencia de los balances energéticos en el proceso económico. Tal como señala Georgescu-Roegen (1971), la economía tradicional vive en un mito energético pues la dinámica del sistema económico sigue la primera ley de la termodinámica. En términos económicos puede interpretarse como la conversión de la energía disponible en su

⁴ Desde la economía ambiental se ha construido una estructura lógica para el entendimiento de los problemas ecológicos basado en la eficiencia del mercado y el sistema de precios. Ante la presencia de externalidades, una solución es la implementación de impuestos -principalmente sobre ganancias o unidad de producto/servicio ofrecido- con el fin de internalizar los costos privados y evitar la pérdida de bienestar social en términos del excedente. Por consecuencia, las emisiones contaminantes reducen. Este mecanismo es usualmente apropiado a Cecile Pigou y su obra *The Economics of Welfare* (1920)

⁵ Un aspecto clave para diferenciar la economía ambiental y la economía ecológica, más adelante descrita, es su fundamento ontológico, epistemológico y metodológico. Para una discusión al respecto véase Spash (2020). Respecto a la ontología ambas ramas convergen al cuestionarse el problema ambiental. La separación se produce en el campo epistemológico y metodológico.

⁶ En efecto, Coase (1960) ante la ausencia de costos de transacción y derechos de propiedad bien definidos, la mejor solución frente a las externalidades es la negociación entre privados. Por tanto, la idea del Estado mínimo se reduce al establecimiento de un marco jurídico para el cuidado de la propiedad privada.

totalidad en mercancías y servicios sin dejar cabida a residuos. Siguiendo este criterio, la energía que gasta el sistema se puede reponer en su totalidad gracias a la innovación y desarrollo técnico. Bajo este escenario atomista, la economía no considera la naturaleza biofísica de los procesos económicos, negando que toda mercancía proviene de un recurso energético.

Al ser un sistema que depende de los flujos energéticos y balances materiales ofrecidos por el sistema ambiental no puede deslindarse de los procesos y leyes que acontecen en esta esfera. Por tanto, el proceso económico, tal como se plantea desde otros enfoques como la economía ecológica, está sujeto a las leyes de la termodinámica que explican el deterioro y disponibilidad de la energía, la entropía⁷

Al mismo tiempo, la abstracción dominante en economía no cuenta con elementos sólidos que expliquen la interrelación de los sistemas, agentes, subsistemas y la evolución de las estructuras en el sistema a causa del desenvolvimiento entrópico. Como señala Passet (2012) el efecto de la entropía sobre un sistema abierto como la economía genera una lucha por información para la creación de estructuras que reduzcan la entropía⁸.

Sin embargo, a pesar de que la innovación y el cambio técnico son premisas relevantes para la economía neoclásica como respuesta al problema ambiental, la propuesta teórica descansa principalmente en los aportes de Porter (1991), Porter y Van der Linde (1995) quienes establecen una relación causal positiva entre la regulación gubernamental y el proceso de innovación ambiental. No obstante, la causalidad en esta relación depende del método econométrico de medición y por tanto la diversidad de resultados es heterogénea (véase Jaffe y Palmer, 1997; Ramanathan *et al.* 2017; Santra, 2017; Cohen *et al.* 2018; Wang *et al.* 2019).

A pesar de ser un enfoque limitado y cuyo potencial se base en la predicción más no en la realidad de sus supuestos⁹, en la actualidad la mayoría de los acuerdos a nivel internacional en materia ambiental siguen la línea causal de la economía neoclásica para extender la lógica hacia la comprensión de distintos fenómenos frente al cambio climático tal como la transición energética. Es decir, el impulso de la tecnología, como un factor exógeno, permitirá superar las

⁷ La entropía es la tercera ley de la termodinámica. Se enuncia como sigue: en un sistema abierto, es decir que intercambia energía y materia, la cantidad de energía disponible para realizar un trabajo disminuye después de un ciclo.

⁸ Este concepto Passet (2012) lo define como negentropía.

⁹ Al respecto véase Nadal (2019).

barreras energéticas y materiales que supone la crisis ambiental. Simultáneamente, la teoría económica del medio ambiente dificulta comprender las implicaciones del proceso económico sobre los balances energéticos y su papel en la generación de entropía, asimismo limita el entendimiento de los mecanismos de la innovación restringiéndola a un proceso de incremento en el acervo de conocimientos.

Esta manera de indagar los problemas ecológicos se traslada a los estudios empíricos donde el análisis del desempeño económico ya sea a nivel macro, sectorial o empresarial se realiza desde una serie de modelos que siguen las premisas neoclásicas como la maximización de beneficios, la estabilidad hacia el equilibrio, la determinación de precios de los recursos naturales y análisis de costos-beneficios. Entre los más utilizados se encuentran los modelos de equilibrio general computable que analizan el impacto de la actividad económica sobre el ambiente (Fujimori et al., 2014, Tang *et al.* 2017, Babatunde *et al.* 2017, Takeda y Arimura, 2021).

La mayor parte de la literatura entre medio ambiente y economía que se puede encontrar descansa sobre estimaciones econométricas y los resultados carecen de algún principio teórico. Por ejemplo, la relación entre crecimiento económico y consumo energético (Chen *et al.*, 2019; Shahbaz y Sinha, 2019; Badeeb, *et al.* 2020), eficiencia energética e innovación (Rennings y Rammer, 2009; Sun *et al.*, 2019; Lemoine, 2020), impacto de políticas de regulación sobre el nivel de emisiones (Akadiri, 2019; Ike *et al.*, 2020; Fortunsky, 2020) y la asignación eficiente de impuestos ambientales (Schlegelmilch *et al.* 2016; Li y Yin 2019; Shipalana, 2020).

El principal problema de la metodología neoclásica y sus estimaciones econométricas es la obtención de resultados que se convierten en recomendaciones de política aun cuando carecen de una base epistemológica adecuada para incorporar los fenómenos ambientales. De esta manera, se desdibuja la relevancia de ciertos sectores causantes del actual deterioro ambiental, su relación con el resto de los sectores económicos, la importancia social de su producción, las implicaciones ambientales de su desempeño y su relación con la biosfera frente a las consecuencias del cambio climático.

La problemática ecológica presente exige de conceptos y metodologías acorde a su dimensión sistémica. Entre las medidas más eficaces para reducir la dependencia de los combustibles fósiles se encuentra la transición energética. Desde la óptica económica

convencional, se considera un proceso de sustitución tecnológica cuya dinámica depende principalmente de los precios, disponibilidad y curva de aprendizaje para el desarrollo de tecnología local. Las discusiones actuales de la transición energética apuntan hacia ir más allá del progreso técnico más allá de las energías renovables (Stanley, 2022). Desde una perspectiva socioambiental, se requiere inscribir el desplazamiento de energías renovables en un marco de esfuerzos sociales, políticos, productivos y acciones productivas (Denzin, 2019).

El desarrollo económico se enfrenta al proceso de continua innovación tecnológica, actualización industrial y diversificación económica (Stiglitz y Yifu, 2013) mientras se busca el cuidado del entorno ecológico que representa un pilar fundamental de la vida. A nivel internacional, las tendencias sobre la transición energética y la descarbonización de la economía están fuertemente vinculada a las políticas de desarrollo productivo y el resurgimiento de la política industrial.

Los efectos de la pandemia de la COVID-19 se considera un punto de inflexión para impulsar la recuperación económica a través del desacoplamiento de las fuentes fósiles, creación de nuevos empleos y el fomento de nuevos sectores estratégicos (Pérez-Urdiales, *et al.* 2021). Desvincular el crecimiento económico, el consumo energético y los impactos ambientales exige ir más allá de los mecanismos de mercado bajo la lógica de externalidades, exige la implementación de instrumentos de política industrial para la identificación de aquellas actividades económicas capaces de generar altos ingresos, buenos salarios, incrementa la productividad y reduzca el impacto ambiental (Altenburg y Rodrik, 2017). Así, tanto la política industrial y la transición energética encuentran motivaciones similares para su implementación, principalmente en el fomento de nuevas industrias y crear mejores perspectivas sociales en términos ecológicos (Karp y Stevenson, 2012)

En el conjunto de sectores estratégicos por su incidencia productiva y el impacto sobre los hogares es el sector eléctrico. En el mundo, las emisiones de dióxido de carbono de este sector representan el 30% (Vine, 2019) y para el año 2040 el 60% de la energía consumida en el mundo será eléctrica (AIE, 2020). Por ello, la tarea de coordinación de los diversos actores en el sector hacia nuevas trayectorias productivas que implican la transición es labor compleja. El sistema eléctrico está conformado con patrones diferenciados de uso doméstico y consumo industrial; desigualdad socioeconómica y acceso desigual a los servicios; procesos de desarrollo

espacial; regulaciones de tenencia de la tierra; gobernanza a nivel municipal y el fuerte papel de influencia que pueden tener los intereses creados en la política y planificación de la electricidad (Baker y Phillips, 2019).

La transición energética del sector eléctrico debe ser justa, equitativa y eficiente, lo que exige la presencia de innovaciones disruptivas (Geels y Schot, 2007), es decir, innovaciones sistémicas que modifiquen la estructura de generación vigente. Lo que impulsa o ralentiza el proceso son los acuerdos institucionales de cada país al delinear la manera en que se relacionan los actores y regula las condiciones de interacción.

Aunque las investigaciones del sector eléctrico principalmente giran en torno a determinar el esquema óptimo de producción eléctrica, ya sea centralizado, descentralizado o mixto (Robertson, 2019) es relevante ampliar el análisis de transición energética del sector a una mirada sociotécnica con implicaciones económicas, sociales y ecológicas específicas. Además, es relevante incorporar una perspectiva bioeconómica para integrar un indicador de sustentabilidad robusto vinculado a la disponibilidad energética. Por otra parte, el análisis de la transición obliga repensar el marco conceptual económico a fin de comprender la dinámica sistémica que implica la sustitución de las energías fósiles por energías limpias.

Incorporar la dimensión micro, meso y macro permite identificar las transformaciones institucionales, reglas operativas, tecnologías, procesos, actores e interrelaciones productivas, para trazar un camino de transición sostenible en términos entrópicos. Con estos elementos, podrá avanzarse hacia una perspectiva socioecológica de la transición energética.

A partir de estas consideraciones, la pregunta general de la tesis es **¿Cuáles son las características del modelo entrópico de generación eléctrica del SEM que garantice una trayectoria energética sostenible?** Complementariamente, las preguntas auxiliares a cada objetivo se enlistan a continuación:

- i) ¿Cuáles son las particularidades del actual proceso productivo de energía eléctrica en México desde una perspectiva bioeconómica?
- ii) ¿Cuáles son las características de la innovación endógena para la generación de energía sustentable?

iii) ¿Qué factores obstaculizan o favorecen el cambio hacia energías sustentables en la generación de electricidad?

iv) ¿Qué impacto tendría la aplicación de un modelo entrópico en el proceso de transición energética en México?

Considerando estas preguntas claves, el objetivo general de la tesis es **proponer un modelo económico entrópico para examinar el proceso de innovación y cambio tecnológico endógeno hacia la transición energética sustentable** que sea aplicable al Sector Eléctrico de México (SEM). Los objetivos particulares son:

i) Caracterizar el proceso productivo de energía eléctrica en México desde una perspectiva bioeconómica.

ii) Identificar procesos endógenos de innovación del SEM hacia una meta de sustentabilidad entrópica.

iii) Identificar los factores sistémicos (agentes, instituciones, estructura de organización productiva, acuerdos institucionales de producción, entre otros) que obstaculizan o favorecen el tránsito energético del SEM,

iv) Modelar el impacto entrópico del sector en diferentes escenarios de tránsito energético considerando los factores sistemáticos.

v) Construir propuestas de política para una transición energética sistémica organizada cuya viabilidad esté supeditada a criterios energéticos y sociales.

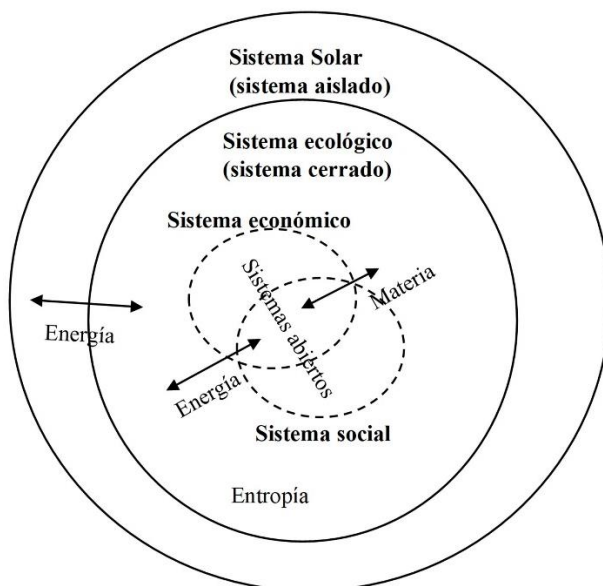
Con el fin de responder estas preguntas de investigación, en la hipótesis de trabajo es la siguiente

El actual esquema de generación eléctrica en México produce altos efectos nocivos contra el medioambiente, por tanto, los actores del sector eléctrico en México se encuentran lejos de una trayectoria energética sustentable. En tal sentido, el proceso de transición del sector eléctrico de México depende principalmente de las políticas de gobernanza energética que modifique la configuración actual de la producción eléctrica. Particularmente, instrumentos como el orden de mérito en la proveeduría de la electricidad y el impulso de la generación distribuida basada en comunidades y cooperativas energéticas permitiría una nueva configuración institucional

del sector. A partir de estos cambios, se garantizaría una transición energética justa, eficiente y asequible conformada por la participación del Estado, empresas privadas y sociedad permitiendo la difusión de las energías renovables.

La figura 1 muestra el esquema de interacciones entre los sistemas

Figura 1. Jerarquía del sistema económico, social y ambiental



Fuente: Modificado de McMahon y Mrozek (1997)

Para lograr este objetivo se plantea la investigación doctoral en dos planos. Ante la ausencia en la teoría económica de un marco de referencia para el análisis de la transición energética, el primero consiste en la elaboración teórica del marco de interacciones que permita considerar los efectos entrópicos de la producción sobre el sistema ecológico y social. El espacio analítico dará cuenta de las interrelaciones de los actores y la trayectoria histórica y social en la cual se dan las innovaciones productivas e institucionales considerando las esferas micro-meso-macro de acción mutua.

Los sistemas abiertos al interactuar generan una dinámica no lineal y adaptativa dan pie a las respuestas creativas de los individuos en términos de nuevas trayectorias tecnológicas sustentables energéticamente dentro del contexto institucional específico. De manera general, a nivel micro se generan las acciones de innovación, el nivel meso impulsa la transición y nivel macro se refleja la nueva trayectoria de transición. Como resultado, los nuevos arreglos

institucionales modificarán el campo productivo tanto en la conformación de actores y formas de producción para contrarrestar los efectos adversos del cambio climático, evaluando su pertinencia en función de la reducción entrópica (pérdida de energía tanto en cantidad y calidad), viabilidad económica y valoración social.

La construcción teórica descansará en los principios de la economía evolutiva, la economía institucional y la bioeconomía, además de unificar las tres visiones a partir de la teoría de los sistemas complejos adaptativos. Los primeros dos enfoques permiten explicar la evolución social, económica y ambiental desde un enfoque dinámico y procesal en relación de la estructura y los individuos en términos de factores endógenos (Hodgson, 2007), además de contribuir a la comprensión del cambio cualitativo en la economía (Chang y Andreoni, 2020). Mientras, desde el enfoque bioeconómico, se sitúa al ser humano en relación con el medio ambiente, integrando la viabilidad de los ecosistemas frente a los desafíos sociales, económicos y culturales (Graedel y Allenby, 2010; Keswani, 2020). Posteriormente, para integrar estos elementos en un sistema general coevolutivo, será necesario un enfoque integrador: Sistemas Complejos Adaptativos.

Los agentes se comportan fuera de la racionalidad neoclásica. Se analiza el Homo Sapiens Oeconomicus propuesto por Foster y Metcalfe (2003) y Dopfer (2005). Este agente tiene una capacidad de respuesta configurada dentro de un conjunto de instituciones y reglas históricamente determinada¹⁰. Los actores poseen tres campos de acción. El primero es el campo individual donde existen dos tipos de reglas (Foster y Metcalfe, 2003; Dossi, 2005; Hodgson, 2007, 2009: objetivas (externas, determinadas por la sociedad) y subjetivas (internas, determinadas por la naturaleza biológica de cada ser humano).

El segundo campo de acción es la sociedad. Para la economía evolutiva, la sociedad está constituida por un conjunto de actores heterogéneos con arquitecturas mentales diferenciadas. De tal forma que los actores que integran una sociedad comparten una estructura artefactual¹¹

¹⁰ Desde la economía evolutiva, las instituciones hacen referencia al conjunto de arreglos y acuerdos formales e informales que hacen a los actores interactuar. Mientras que las reglas son pautas condicionales o incondicionales del pensamiento que los agentes pueden adoptar de manera consciente o inconsciente (Nelson y Sidney, 1982).

¹¹ Es el conjunto de creencias, instituciones como reglas e incentivos a la vez, herramientas, instrumentos, tecnologías, todos estos legados por la cultura nacional (Jeannot, 2020).

El tercer campo de interacción es la escala meso, área no abordada de manera adecuada en la economía tradicional. Este escenario hace referencia al conjunto de instituciones formales que son herencia de la trayectoria social y cultural de cada sociedad. A este nivel se reflejan los cambios históricos y sociales resultados del cambio institucional de las sociedades. La interacción de actores heterogéneos configurados en un conjunto de reglas e instituciones genera los cambios hacia una función objetivo del sistema.

Así como el entorno tiene mecanismos de acción, el proceso económico posee restricciones. La primera hace referencia al nivel de entropía generado en los años previos en el sistema y cuyas consecuencias adversas se heredan en el tiempo actual, incentivando a la sociedad en su conjunto a generar innovaciones tecnológicas físicas y sociales que sean productoras del mínimo nivel entrópico en la producción. La segunda restricción son los arreglos institucionales formales de cada sociedad que evolucionan lentamente.

En consecuencia, el mecanismo de innovación endógena, como se señaló previamente, consiste en la apropiación de conocimiento para construir estructuras productivas que reduzcan el nivel de entropía. Es decir, un proceso de transformación técnica, institucional y de reglas que permite disminuir los niveles entrópicos del proceso productivo en favor del medio ambiente y la sociedad al tiempo que el proceso económico continúa. Dicho comportamiento en una dinámica sistémica puede entenderse como una propiedad emergente que permite al sistema mantener sus propiedades homeostáticas.

De manera empírica se aborda la dinámica del SEM en tres niveles. La primera consiste en el análisis bioeconómico. La construcción de un indicador bioeconómico que mida el nivel de generación entrópica favorece el entendimiento sobre el consumo y las pérdidas energéticas que incurre cada forma de producción en el SEM.

La segunda herramienta consiste en el uso del Modelo Multinivel Bioevolutivo (MMB), que se trata de un marco teórico propio y original que analiza el proceso de transición socioambiental desde una perspectiva sistémica. Además, las acciones de los actores y la dinámica entre sistemas cuentan con microfundamentos económicos, aportando así elementos teóricos en la economía para comprender la transición energética. Esta técnica permite modelar la dinámica del sector como un subconjunto de actividades económicas en relación con otros sectores productivos, al tiempo que identifica los lugares donde se generan las innovaciones,

distinguir la configuración del sistema social, prácticas y reglas y finalmente considera los factores exógenos que pueden incidir sobre la transición energética.

La tercera herramienta es el uso de modelos basados en agentes. Debido a la naturaleza de las interacciones, se requiere de una estrategia de modelación que captura la heterogeneidad de actores, las diferencias productivas y la dinámica. Se construye un modelo de simulaciones computacional que se apega a los fundamentos teóricos del MMB a fin de evaluar el impacto de dos medidas de gobernanza energética en la evolución de las energías renovables: el orden de mérito y una tarifa de conexión preferencial para el desarrollo de generación eléctrica descentralizada.

La tesis está integrada de 5 capítulos. El primer capítulo hace referencia a una revisión bibliográfica acerca del papel de la naturaleza dentro del pensamiento económico y su vínculo con la teoría de las transiciones. Conjuntamente, se colocan las bases y horizontes pendientes por la disciplina para el análisis de la transición energética.

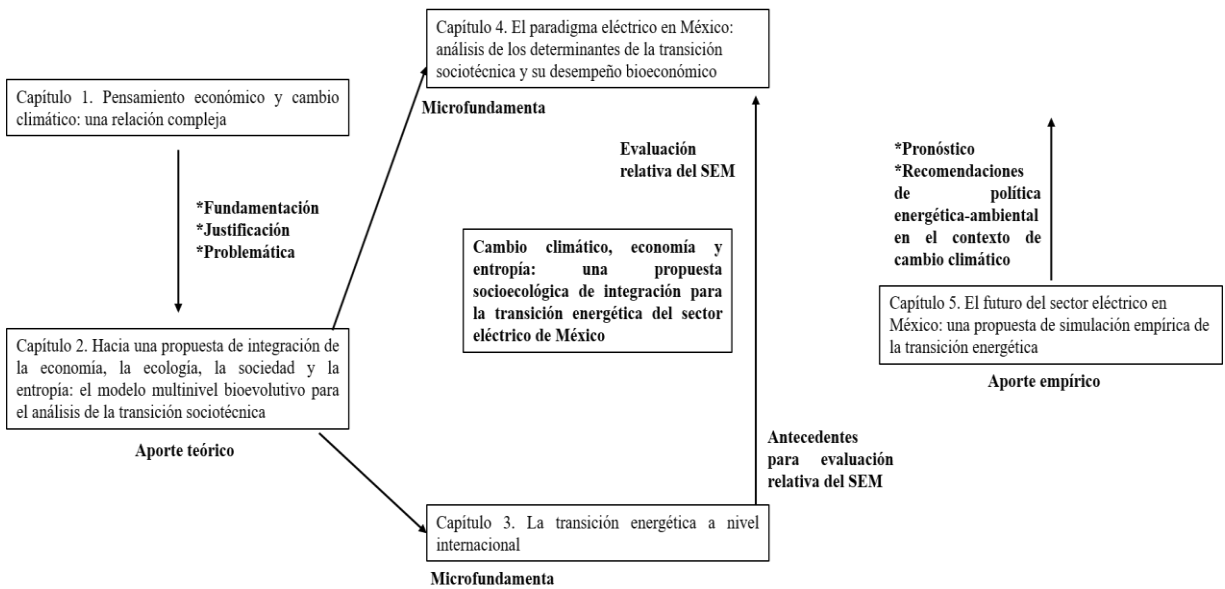
El segundo capítulo consistiría en la construcción teórica del modelo de interacciones a partir de la bioeconomía, economía evolutiva y los sistemas complejos adaptativos. A partir de la propuesta teórica, en el capítulo 3 se analiza el proceso de transición energética del sector eléctrico en 5 países que son representativos, pero al mismo tiempo poseen una dinámica específica: Alemania, Estados Unidos, China, Reino Unido e India. El objetivo es comprender los retos y obstáculos en el tránsito hacia la descarbonización. El capítulo 4 se concentra en el caso de México. Se analiza la trayectoria histórica del SEM con la finalidad de identificar los aspectos micro-meso-macro que han representado cambios sustanciales en la conformación del sector y a partir de ello detectar los elementos que obstaculizan o impulsan la difusión de las fuentes renovable. Finalmente, el capítulo 5 muestra un ejercicio de simulación computacional para analizar las posibles trayectorias del SEM en materia de energías renovables con base a los instrumentos de gobernanza energética exitosos descritos en el capítulo 3 como el orden de mérito y la tarifa de conexión. A partir de los resultados se ofrecen una serie de recomendaciones de política económica y ambiental para el presente y futuro del sector.

La estructura capitular de la tesis intenta ser consistente metodológicamente. La figura 2 presenta las retroalimentaciones entre los capítulos. El número 1 plantea la justificación, fundamentación y problema de investigación. Considerando la controversia teórica y empírica,

el capítulo 2 presenta el soporte teórico de la tesis, cuya finalidad es aportar al vacío detectado de la transición socioambiental desde la economía y fundamentar el resto de los capítulos.

Con el MMB desarrollado, se analiza las tendencias internacionales de la descarbonización del sector eléctrico en el capítulo 3. A la luz de las lecciones y la recopilación de las mejores prácticas para el desarrollo de las energías renovables, el capítulo 4 se enfoca en el caso mexicano y la trayectoria histórica que dan lugar a su actual configuración. Conjuntamente, se avanza en el análisis con la construcción del indicador de generación entrópica. Finalmente, el capítulo 5 incorpora el soporte empírico sustancial del trabajo y que permite el aporte sustancial en términos de recomendaciones de política económica y energética frente a los retos del cambio climático.

Figura 2. Estructura de tesis, interacciones y consistencia metodológica



Fuente: Elaboración propia

**CAPÍTULO 1. PENSAMIENTO ECONÓMICO Y CAMBIO CLIMÁTICO: UNA
RELACIÓN COMPLEJA**

Introducción

El análisis de los problemas ambientales desde la economía representa un área de estudio novedosa y en crecimiento, aunque se trata de un elemento debatido con anterioridad desde los orígenes de la disciplina. La vertiente dominante considera el problema ecológico actual como una falla de mercado cuya prevención radica en la búsqueda de mecanismos de mercado para su mitigación. Así, el abordaje de la transición energética se realiza desde una perspectiva estilizada donde la reducción de las emisiones de efecto invernadero depende principalmente de la inducción de nuevas tecnologías. Sin embargo, bajo esta perspectiva, los fenómenos ecológicos y su relación con la economía se establecen bajo criterios esencialmente de precios, reduciendo la interacción del sistema ecológico y económico a un problema de precios.

Si bien la disciplina económica tiene definido su campo de interés respecto al resto de ciencias sociales y exactas, el análisis económico requiere replantear las bases epistemológicas con las cuales aborda las cuestiones ambientales a fin de ofrecer propuestas económicas eficaces que provengan de un marco analítico coherente con la realidad. En este contexto, el capítulo tiene la finalidad de presentar un análisis general del papel de la naturaleza en el pensamiento económico para comprender el distanciamiento de la perspectiva holística que llevó a centrarse en el individualismo metodológico. Este enfoque sustenta a la economía neoclásica y es aplicado en la economía del medio ambiente, área dominante en el análisis actual.

El objetivo de esta revisión se sustenta en el interés por comprender las bases con las que cuenta la economía para poder integrarse al debate de la transición energética, los aspectos necesarios para abordarla y señalar la vertiente más apropiada. Actualmente, la crisis ambiental es un factor que ha incrementado las brechas de género, de ingreso y riqueza, potenciando la vulnerabilidad social.

Frente a esta problemática, la transición energética se considera una vía de solución apropiada para frenar el problema climático y al mismo tiempo garantizar el suministro energético que requiere la sociedad. Sin embargo, es relevante incorporar elementos sobre la dinámica social y ambiental para contar con una visión conjunta de la transición, es decir, la transición socioambiental, discusión que se presenta más adelante.

El análisis del capítulo servirá para rescatar los aportes necesarios para la construcción de un enfoque alternativo de la transición desde la economía que se desarrolla en el capítulo 2.

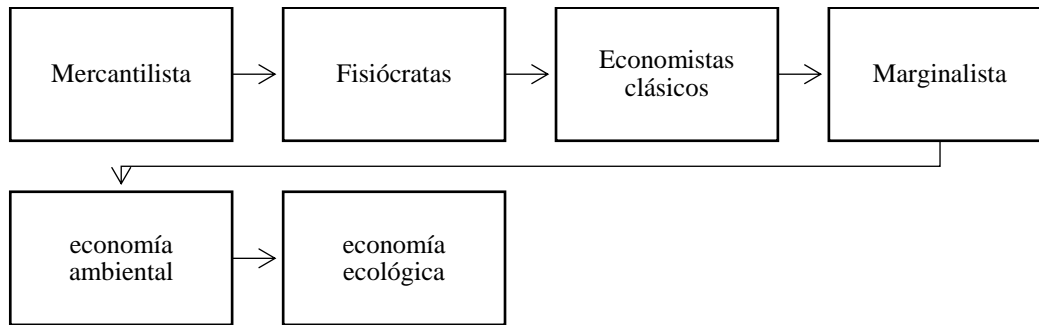
Principalmente, vincular el ciclo económico con la bioeconomía, la innovación, el espacio institucional y la entropía.

El desarrollo del primer apartado tiene como objetivos presentar la discusión de las bases teóricas de la investigación. La pregunta que guiarán el siguiente apartado son las siguientes: ¿cuál ha sido la relación entre la naturaleza y el pensamiento económico? ¿por qué la economía privilegió al enfoque neoclásico en el análisis? ¿qué aportes pueden retomarse en la historia del pensamiento económico-ecológico para los actuales y complejos retos que requiere una sustentabilidad energética? ¿qué tipo de enfoques podrían sustentar la construcción de un marco alternativo de la transición energética desde la economía? ¿por qué es relevante, desde la evolución del pensamiento económico y naturaleza, retomar las categorías de entropía, innovación e instituciones como elementos claves de la sustentabilidad?

Se realiza un breve recorrido por las principales corrientes de la economía que permite a la investigación dimensionar el contexto histórico e influencias externas que acompañaron la comprensión de la naturaleza en el núcleo analítico correspondiente. La finalidad no es realizar una historia profunda sobre este tema sino sintetizar los elementos básicos de cada enfoque para esbozar el grado de importancia del medio ambiente en la definición de los procesos económicos.

El diálogo en ausencia de diversos economistas que se presenta a continuación permite rescatar diversos elementos y categorías para transitar hacia un enfoque permisible de la transición sustentable en términos energéticos desde la economía como disciplina. Detrás de cada interpretación económica existe una forma de ver la realidad que después se traduce en la eficacia de la política pública generada desde ese enfoque epistemológico. Por lo cual, se reitera la necesidad de reconciliar el pensamiento económico hacia el reconocimiento de factores actualmente ausentes como la entropía y dilucidar el papel de la innovación en tecnologías físicas y sociales como vía de desarrollo.

Figura 1. Estructura de análisis del pensamiento económico



Fuente: Elaboración propia con base en Daly (2007) Gorostiza (2015), Kula (1998)

Para esta sección, se sigue una clasificación con base en los autores planteados. Como señala Letwin (1963) antes de 1660 no había economía y para 1776 había en abundancia, por lo cual, se abordan las escuelas económicas desde el siglo XVII hasta la actualidad. En particular, para la economía ambiental y economía ecológica, enfoques que predominan el actual análisis medioambiental, se construyó una clasificación propia con base en la revisión extensa de la bibliografía, quedando de la siguiente manera.

Economía neoclásica	Economía ecológica
1. Cambio climático y desarrollo sustentable	1. Decrecimiento y desmaterialización
2. Medio ambiente y equilibrio general computable	2. Metabolismo social y sistema socioecológico
3. Consumo energético, emisiones y crecimiento económico	3. Movimientos sociales, justicia y ética ambiental
4. Regulación ambiental, competitividad e innovación	4. Economía ecológica de los pobres y economía ecológica radical
5. Impuestos ambientales	5. Desarrollo sustentable y ecología industrial
6. Contabilidad ambiental	6. Termodinámica y bioeconomía

Con este esquema, será posible señalar la importancia de la termodinámica y bioeconomía para el desarrollo de esta tesis. Este capítulo se construye de 3 apartados. El primero aborda el papel de la naturaleza dentro del pensamiento económico comenzando por el mercantilismo hasta llegar a la economía neoclásica. El segundo apartado señala la visión de los problemas medioambientales desde la postura neoclásica con el fin de entender sus límites y debilidades para explicar la dinámica sociedad-economía-naturaleza frente al tema de la transición energética. El tercer apartado propone la alternativa de la economía ecológica como un marco integrador, haciendo hincapié sobre la bioeconomía y ecología industrial como

enfoques pertinentes para desarrollar la investigación. El capítulo concluye con una reflexión final acerca de los principios claves para transitar hacia un camino de sustentabilidad entrópica y que se incluirán en la propuesta original de transición socioambiental del capítulo 2.

1.1 El papel de la naturaleza en el pensamiento económico clásico

1.1.1 El medio ambiente finito y la idea mercantilista

Esta corriente de pensamiento surge en Inglaterra durante el siglo XVI consolidándose plenamente durante el siglo XVII. En este periodo, el imperio británico era el más fuerte del mundo. La concepción acerca de su poderío hizo, de acuerdo con Sweet (1999), comprender la economía inglesa como un sistema económico.

La obtención de la riqueza plantea al comercio como fuente de valor el comercio internacional. Bajo la idea de sistema económico, el bienestar del reino dependía de la apertura respecto a las colonias. En este sentido, Magnusson (1994) afirma que el pensamiento mercantil representa un punto de ruptura con el conocimiento agrario medieval previo respecto a una interpretación con raíces materiales de la riqueza.

En efecto, la forma en que el imperio inglés se beneficiaría del comercio internacional sería a través del ingreso de oro y plata a partir de la venta de productos nacionales. Kankin (2011) apunta que la idea de progreso estaba sustentada en la idea de incremento de la riqueza a través del comercio y bajos salarios debido que una situación contraria haría que los trabajadores produjeran menos. Por otro lado, el exceso de ingresos de metales preciosos se relacionó al incremento de precios. Estos fenómenos apuntan hacia los primeros análisis económicos que vinculan el comercio, bienes, salarios, términos de intercambio e inflación.

El primer trabajo que hace referencia a estos fenómenos es *A Discourse of the Commonweal 1536-1949* aparecido en el último año y cuyo autor no se tiene referencia. El manuscrito aborda el papel de la inflación durante la mitad del siglo XVI atribuyendo las causas del exceso de lingotes de oro provenientes de las colonias. Un aspecto persistente es la proyección de los comerciantes ingleses hacia la búsqueda de nuevos lugares para ganancias a través de la transformación de los bienes agrícolas en bienes comerciables para intercambiar.

La visión del mundo mercantilista corresponde a la búsqueda de bienes naturales, ya sea en forma de alimentos o en cantidades de oro y plata como manifestación del valor. Como señala

Pincus (2012) el comercio exterior era un sitio de suma cero que obligaba a las potencias imperiales pelear ferozmente por recursos ambientales limitados. Junto a ello, Rollison (2010) apunta que Inglaterra pasó por severos problemas de producción de alimentos durante el siglo XVII cuya solución fue recurrir a las tierras colonizadas para intercambiar los bienes de la industria de jabones por granos básicos.

La visión suma cero del mundo hizo creer a los mercantilistas que la expansión del imperio dependía de la competencia por las tierras y subordinación de las colonias. La finitud de los recursos naturales provocó una lucha feroz por los bienes que representarían una balanza comercial favorable para obtener ventaja sobre las naciones rivales. De acuerdo con Joel Mokyr (2010) el consenso mercantilista insistió en la expansión de tierra como fuente de poder.

En esta época del naciente pensamiento económico es evidente la influencia del contexto histórico que representa el surgimiento de las potencias nacionales europeas. El mundo natural es crucial en la dinámica de las naciones a partir de la proveeduría de recursos financieros (oro y plata), alimentos e insumos para las actividades económicas. La concentración de mayores bienes naturales era fuente de poder político y económico. En ningún momento aparece alguna consideración sobre la cantidad de residuos generados, en cambio, existe una concepción de finitud de la naturaleza. Sin embargo, los límites naturales de la tierra fueron elementos de fuertes conflictos. Puede concluirse que el factor ecológico en el crecimiento económico fue relegado a proveeduría, desechos, subordinación colonial y conflicto entre potencias.

1.1.2 Naturaleza: la fuente de valor de la economía. La perspectiva fisiócrata

Transcurrido algunos años surge en Francia un movimiento denominado Fisiócrata. De acuerdo con Ware (1931) sus participantes pertenecían a la clase noble francesa. Durante el siglo XVIII, Francia era una nación ineficiente en términos económicos respecto a la industria inglesa. Junto a ello, Europa sufría recurrentemente de hambrunas. Como señala Burkett (2003) en el país galo predominaba una estructura de origen feudal.

Es fácil distinguir a dos exponentes de esta escuela: Quesnay (1758) y Turgot (1766). Estos pensadores consideraron a la naturaleza como la fuente de valor, cuya génesis aparentemente es un “regalo” al igual que en la economía de Aristóteles, de la cual los hombres pueden dominar y orientar hacia sus necesidades. François Quesnay, al ser un médico de profesión, asimiló al sistema económico como un cuerpo humano donde existía un flujo circular

de la producción al igual que la sangre por las venas. Bajo esta consideración, intentaba explicar las crisis a través de las leyes que gobiernan la producción y distribución de la riqueza tal como sucede con las leyes naturales que rigen la vida biológica.

Entre ambos autores existen algunas diferencias. En primer lugar, en Turgot la riqueza real proviene de las materias primas y los bienes de subsistencia generada por la tierra. El excedente se genera a partir de aplicar el trabajo a la agricultura. En efecto, el trabajo no agrícola únicamente transforma el excedente que genera el trabajador agrícola. La agricultura produce por sí sola los medios de subsistencia (regalo) pero requiere trabajo para que lo impulse. Para que la cantidad de bienes producidos incrementen eran necesarias mejoras en la fertilidad agrícola.

Respecto al trabajo humano, éste únicamente se valorizaba si se encaminaba hacia la producción agrícola. De tal manera que la riqueza proveía de la tierra y el excedente era realizado por el trabajador. Cuando se decidía producir más allá de sus necesidades, el resto de los sectores se beneficiaban. Este punto surge la división de la economía entre la clase productora (trabajadores agrícolas) y las clases estériles como el comercio que únicamente intercambiaba los valores.

Mientras, para Quesnay no era relevante distinguir entre trabajadores agrícolas y capitalistas sino su interés fue el crecimiento del producto neto, es decir, el restante de la producción después de retirar los bienes que los trabajadores agrícolas necesitan para la reproducción. Siguiendo el principio de las leyes naturales de la producción, como ya se señaló, la economía funciona bajo un esquema circular y no necesita fuerza externa para su buen funcionamiento. De aquí se deriva una herencia para la historia del pensamiento económico, el principio "*laissez-faire*".

La *Tableau économique* estableció las condiciones para la reproducción del proceso. Para ello, el tamaño del producto neto sería mayor si las autoridades retiraran los impuestos a las exportaciones, además si existían restricciones a las importaciones, el precio de los productos locales aumentaría y conduciría a incrementos en el nivel de ingreso.

La visión de los dos grandes exponentes sitúa a la naturaleza en el centro de la fuente de la riqueza nacional. La política económica tendría que conducir al incremento del producto neto local y con ello producir mayores ingresos. En materia ambiental, puede deducirse la

importancia de la naturaleza en la creación de bienes en auxilios de las autoridades económicas para incrementar su valor. De cierta manera, puede considerarse un proceso comercial e industrial como transformadores de energía más no creadores de riqueza.

Es decir, existe una relación directa entre la dinámica económica y las condiciones climáticas que permita incrementos de la fertilidad. Bajo esta dimensión, un país con altos niveles de comercio e industria se detendría su buen desempeño por empobrecimiento de las condiciones agrícolas y el trabajo no sería capaz de crear excedente pues su único valor social aparece si se aplica a la tierra. El valor de la naturaleza desecha cualquier posibilidad de mejoras en el ingreso derivados del capital. El sistema en su conjunto llegaría a su fin siempre y cuando los ecosistemas agotaran su capacidad de regeneración.

1.1.3 ¿Abundancia de recursos naturales?: La economía clásica

La publicación de *La Riqueza de las Naciones* (1776) estableció un nuevo esquema de reglas y relaciones lógicas para interpretar los fenómenos económicos respecto al pensamiento mercantilista y el paradigma fisiócrata francés. A diferencia del comercio y la agricultura como fuente de valor, la economía clásica, de acuerdo con Bidard *et al.* (2006), se preocupó por explicar la producción y la riqueza.

El entorno dentro del cual se desarrolla la economía clásica es crucial para determinar el perfil de los pioneros. La evolución de las ideas cambió al ritmo de las condiciones materiales de la sociedad. Las instituciones feudales caracterizadas por ser decadentes y corruptas (Huberman, 1936) fueron remplazadas por los ideales de la revolución francesa. La burguesía naciente necesitaba eliminar las viejas instituciones feudales y encontró la expresión de sus necesidades en los escritos, principalmente de Adam Smith y Voltaire, la representación correcta de sus ideales.

En este nuevo estadio, los economistas ingleses retomaron algunos elementos de la escuela fisiócrata para su desarrollo teórico. Principalmente en referencia de la obra de Adam Smith (1776), pilar fundacional en el nacimiento de la economía como disciplina. El economista escocés recurrió a la idea de trabajo aplicado, ahora en la industria en lugar de la tierra, para explicar la riqueza de las naciones; en particular, la división del trabajo permite el incremento de la capacidad productiva del sistema económico. La teoría del valor-trabajo (TVT) se convierte en el instrumento científico para explicar la creación de la riqueza. Por su parte, Jean-

Baptiste Say (1803) dedica su obra económica a la producción, distribución y consumo de la riqueza, mientras que David Ricardo (1817) concentró su análisis en la distribución de la producción entre rentas, salarios y ganancias, siendo una representación de la lucha de clases por el excedente.

La defensa del individuo libre y la generación de riqueza en sociedades industriales nacientes fueron los principales fenómenos históricos que dirigieron la génesis del pensamiento de la economía clásica. En esta línea, Montesquieu (1748) y Stuart Mill (1848) creían que la expansión del comercio e industria eliminarían la toma de decisiones arbitrarias del soberano, mientras que David Ricardo insistía en la derogación de la Ley de granos en Inglaterra por considerarla un obstáculo a las ganancias y al desarrollo económico (Gramm, 1973).

La defensa del pensamiento como la máxima libertad individual y mínimos obstáculos a la acumulación del capital se conjugó con otro suceso histórico: la revolución industrial. Esta época desencadenó un desgaste energético nunca visto basado principalmente en biomasa. Como señala Grinevald (2009) este periodo de la civilización fue una guerra de apropiación y explotación contra la naturaleza. La interpretación coincide con la Boutillier (2016) para quien el siglo XVIII en Inglaterra existía la noción aristotélica sobre la naturaleza al considerar la tierra, el viento, el agua y todos los recursos naturales estaban a disposición del ser humano para la satisfacción de necesidades.

En el desenvolvimiento de esta primera etapa científica del pensamiento económico, de manera comprensible, no existe una preocupación por los problemas ambientales reflejado en su ausencia dentro de la construcción teórica. El impulso histórico en busca de la libertad absoluta del ser humano en conjunción del desarrollo industrial no planteó ningún cuestionamiento sobre la disponibilidad y deterioro de los recursos ambientales ni representó un límite a la producción. El objetivo era la acumulación de la riqueza a toda costa. En todo caso, se puede realizar ciertos matices acerca de los siguientes autores.

Por un lado, David Ricardo planteando los límites de la agricultura a razón de los rendimientos decrecientes, al tiempo que Thomas Malthus y su teoría de la población plantea una tendencia hacia la escasez de alimento a causa de mayor ritmo en la tasa de crecimiento poblacional respecto a la producción agrícola. Por otro lado, en Karl Marx aparece una crítica fuerte sobre el modo de producción capitalista que atenta contra el trabajador. Además, de

acuerdo con Boutiller (2003, 2016) existen en el economista alemán desazón hacia el sistema por destruir el ambiente. En coincidencia, Schmidt (2013) y Toledo (2013) reconocen en Marx el antecedente del metabolismo ecológico, concepto concurrido en la economía ecológica y que será detallado más adelante. Contra esta visión, Ramos (2015) señala que los economistas clásicos, incluido el propio Marx, representan la primera ruptura de la disciplina con el aspecto real, separando los aspectos físicos de la actividad, siendo un avance firme en la reducción analítica del campo de estudio.

1.1.4 La naturaleza marginal del equilibrio general: los marginalistas

Al final del siglo XIX Stanley Jevons, Carl Menger y Leon Walras constituyen una ruptura en el tránsito de la disciplina. El desarrollo de las matemáticas y el auge de la mecánica clásica influyeron en los considerados fundadores de la economía moderna. El estudio de la economía como una interrelación entre clases sociales dentro de un contexto histórico pierde interés. El sistema se caracteriza como un núcleo cerrado cuyo comportamiento obedece a una lógica similar como en la física. Como señala Georgescu-Roegen (1971) la naturaleza mecanicista, cuyo núcleo no puede entender los cambios cualitativos, inspiró la construcción de una ciencia económica replicando la lógica mecánica y reduciendo la complejidad del proceso económico a un conjunto de ecuaciones matemáticas.

La economía se orientó hacia el descubrimiento de las leyes que rigen los procesos de consumo y producción, acompañado de avances estadísticos que permitiría desarrollar a la disciplina de manera empírica similar a una ciencia exacta. La sociedad es vista como un sistema cerrado donde la unidad de análisis central es el individuo. El individuo como centro protagónico determina el valor de las mercancías producidas, dejando de lado la distribución del excedente y lucha de clases planteado por los economistas clásicos. Así, la TVT fue desplazada por la teoría subjetiva del valor (TSV) la determinación del valor de las mercancías se determina por la escasez.

Para lograr este resultado, el individuo se define bajo el principio de *racionalidad*, es decir, maximizar la utilidad subjetiva de su consumo. Al construirse de forma abstracta a través de reglas de decisión simples, es posible agregar el comportamiento individual para explicar el comportamiento general del sistema. Esta forma de análisis se conoce por individualismo metodológico.

La libre acción de los sujetos aislados de cualquier contexto social dentro un engranaje determinado por leyes generales lleva al sistema a la mejor asignación de los recursos. La importancia del equilibrio general desarrollado por Walras, cuyo elemento básico es la determinación racional de los precios, radica en la representación armónica del proceso económico donde los intereses individuales y trayectoria natural de los mercados se vuelve en la economía objetivo. Además, el principio desarrollado por Pareto garantiza que el equilibrio, además de la determinación de precios, garantiza la mejor solución eficiente.

El cambio de escenario analítico cambia radicalmente los fundamentos del análisis científico de la economía. Se abandona cualquier relación con el mundo concreto de la producción y distribución como los economistas previos, optando por un análisis subjetivo que depende de la percepción del individuo y la escasez relativa de los bienes.

Si bien, como se mencionó, los economistas clásicos dieron el primer paso hacia el abandono de las condiciones físicas de la producción al determinar la fuente de riqueza el trabajo aplicado a la manufactura, el marginalismo abandona por completo el mundo físico y el papel de la naturaleza en la formación del valor en las sociedades. A pesar de que la segunda mitad del siglo XIX la contaminación a causa del desarrollo industrial aparece principalmente por la quema de carbón, la abstracción del sistema económico produce que los vínculos con el medio natural desaparezcan.

1.2 La formalización de la naturaleza en los modelos neoclásicos

El desarrollo de la escuela marginalista construyó los cimientos de la economía neoclásica. Inspirada en los principios elementales de individualismo metodológico, el principio de escasez para la determinación de precios, racionalidad del individuo y el uso de la TSV definen el objetivo de ciencia económica como “las formas que reviste la conducta humana de disponer de los medios escasos” (Robbins 1944,38).

Con el trabajo de Alfred Marshall (1890) quien, en un intento de integrar los determinantes de la oferta de la economía clásica y su teoría de la formación de precios con base en el principio de utilidad desarrollada por los marginalistas, instaaura el comienzo del enfoque predominante hoy en día de la disciplina: la economía neoclásica.

Bajo este enfoque, un punto elemental es la preponderancia del consumo como centro de la dinámica y el individualismo metodológico. A partir de la unidad analítica individual es posible derivar los fenómenos agregados como una sumatoria de comportamientos. El nivel macro es la suma de comportamientos micro. No es necesario conocer el comportamiento de la totalidad si a partir de análisis de un agente específico puede derivarse el resto pues se deduce por analogía. Este elemento se conoce como agente representativo.

Ahora, el agente representativo requiere un tipo de comportamiento específico. Retomando el principio de racionalidad, este supuesto reduce cualquier tipo de sentimiento, pasión o interés que tenga el ser humano. La racionalidad perfecta neoclásica supone que el Homo Economicus únicamente busca la satisfacción de su bienestar personal, expresado en utilidad subjetiva, a partir de un proceso de maximización que puede representarse a través del cálculo. Como señala Shackle (1990) el comportamiento humano es reducido a una fría calculadora de utilidades.

Por otra parte, el agente representativo decide la forma de asignar su ingreso en la compra de bienes. Siguiendo un esquema circular, el ingreso generado se reparte entre pagos a factores: capital y trabajo. Con el ingreso recibido, los agentes realizan sus acciones de consumo. Frente al mercado, las preferencias de consumo deben cumplir con ciertas características. Primero deben ser reveladas, es decir, el agente necesita ser explícito acerca del bien que busca consumir. Para evitar problemas en el ordenamiento, las preferencias están sujetas a condiciones matemáticas: transitivas, continuas y convexas. Es decir, no se dice nada acerca de la formación de las preferencias asumiendo su origen exógeno, definiéndose estrictamente en el momento de la elección de consumo.

Este agente representativo acude al mercado, que es un espacio neutro encargado de asignar los recursos de manera eficaz, donde las empresas ofrecen bienes bajo la técnica dada a un precio igual a su costo marginal. Como el espacio analítico supone un sistema cerrado, los procesos son reversibles de tal forma que si el individuo no queda satisfecho con su asignación puede ajustar su acción sin consecuencia alguna.

Bajo estas delimitaciones teóricas destacan dos principales aportes. En primer lugar, en 1957 se logra el máximo nivel de sofisticación de la disciplina al demostrar de manera formal las principales conjeturas planteadas por el pensamiento marginalista, la famosa mano invisible

de Adam Smith y la síntesis de Marshall: la demostración del equilibrio general competitivo de Gerard Debreu y Kenneth Arrow. Entre los elementos más importantes del modelo en una economía de n mercados, n mercancías y n agentes, sin dinero, sin clases sociales, sin Estado, agentes racionales con dotaciones iniciales, consumidores y productores que maximizan su utilidad, tecnología idéntica de los productores y pago a factores correspondiente a su contribución marginal, se demuestra que el equilibrio general existe y es la mejor situación posible para productores y consumidores.

En segundo lugar, la obra de Arthur Pigou (1912) y su Economía del Bienestar señala que la economía está sujeta a fallos de mercado. Es decir, las actividades productivas pueden generar efectos negativos sobre otros individuos conduciendo a menores niveles de bienestar. Estas acciones se consideran *externalidades*. Para retornar a la situación de equilibrio es fundamental la intervención del Estado ya sea implementando regulaciones, impuestos o incidiendo sobre la redistribución del ingreso con el fin de regresar a los niveles previos de bienestar y equilibrio.

A partir de los elementos enlistados, la disciplina alcanzó un carácter científico. La revolución dentro de la ciencia económica se consolidó por el impacto del positivismo lógico en las disciplinas sociales. La apropiación metodológica positivista implica que el potencial de una teoría radique en el poder de predicción a partir de una serie de generalizaciones y no en el realismo de sus supuestos. Bunge (1975) señala que la revolución científica del método en las ciencias sociales a finales de la posguerra terminó con el uso de expresiones poco clara para expresar ideas transitando hacia la homogenización de técnicas siendo la única diferencia el objeto de estudio. Problemas como la desigualdad, pobreza y medio ambiente son externalidades del proceso de producción.

En efecto, bajo este fundamento analítico se desarrolló el enfoque de la economía ambiental. Desde esta óptica analítica, se desprenden las siguientes implicaciones: i) la economía parte del equilibrio, por lo cual, los problemas ambientales y el cambio climático son externalidades que no se producen al interior de la producción. Cualquier política pública busca internalizar la falla y retornar hacia el equilibrio. ii) El sistema económico es representado como un núcleo cerrado donde las leyes económicas determinan la dinámica del sistema social y ambiental. iii) Al seguir los principios de la física clásica, no existe pérdida en la cantidad de

energía, es decir, no hay existencia de entropía. Todo el trabajo de los factores se convierte en producción y la producción en pago a factores. iv) Los bienes naturales están sujetos al principio de escasez y la TVS. La marcha de mercados eficientes permite transmitir, a través del precio, las condiciones de disponibilidad. Al ser la naturaleza un bien libre, cualquier falla en la transmisión del precio puede causar sobreexplotación.

A raíz de la preocupación por los temas ambientales, se desarrolló una vasta cantidad de subramas especializadas en cierta temática pero que cuentan con el trasfondo analítico neoclásico sintetizados en las líneas anteriores. Como señala Ken (2020) es curioso que gran parte del debate climático se coloque particularmente en términos de economía y que los cálculos económicos sean dominantes en la política climática en el mundo. Es de tal magnitud su influencia que domina los planes internacionales que combaten el cambio climático. A partir de la revisión literaria propia, se presenta una breve reflexión de los principales enfoques dentro de la economía ambiental. El objetivo de los siguientes apartados es identificar los elementos

1.2.1 Cambio climático y desarrollo sustentable

Esta perspectiva puede considerarse pionera en la economía ambiental. Existe gran interés por indagar sobre las mediciones del cambio climático y su impacto sobre la actividad económica. El máximo representante es William Nordhaus quien en diversos artículos (1973, 1993, 2018) ofrece estimaciones sobre escenarios específicos. El objetivo relacionado a evitar el incremento de la temperatura planetaria más allá del rango entre 1.5°C-2°C se convierte en un parámetro base para identificar los efectos diferenciales sobre el ingreso.

Para los teóricos vinculados a esta temática argumentan que comprender la dinámica del cambio climático permite estimar los impactos de las políticas públicas diseñadas para mitigar los efectos adversos. La eficiencia de los instrumentos de política resulta útil para diseñar esquemas alternativos y transitar hacia el desarrollo sustentable. En efecto, desde esta visión, el quehacer político permite mitigar los riesgos climáticos y posibilita la continuidad del actual estilo productivo y de consumo sin restricción alguna.

La idea imperante radica en la internalización del cambio climático. Al ser una externalidad que no se vincula a la producción, es decir de carácter exógeno, la política pública debe reducir e internalizar sus impactos. Se parte de una situación ideal donde el sistema funciona con normalidad y repentinamente llega el problema climático. Las políticas permiten

regresar a la situación previa, sin ninguna consecuencia, y los mecanismos se heredan para solucionar situaciones futuras. Allí radica la importancia de evaluar el impacto de cada acción, visualizar su trayectoria y decidir la más eficiente.

Para medir la eficiencia de las medidas de mitigación se toma como parámetro el sistema de precios. Como señala Requate (2005), el actuar público debe evitar la distorsión de los precios. Esta variable permite a los individuos evaluar el costo de combatir el cambio climático. De tal manera, deben existir los incentivos suficientes para seguir esta vía, mientras la sociedad se encarga de elegir el nivel socialmente deseable de protección ambiental compatible con sus exigencias materiales. Los teóricos vinculados a este tema consideran el problema ambiental de manera global, cuyos impactos son de largo plazo y como un tema clásico de externalidades. Eliminar las fallas del mercado es la condición básica para cumplir con el desarrollo sustentable (entre ellos, Owen y Hanley, 2004; Stavins, 1995, Alver *et al*, 2020). Siguiendo a Shorogen (2005), los responsables de políticas deben considerar: i) Definir el cambio climático como falla de mercado; ii) enmarcar la protección ambiental desde costos y beneficios; iii) identificar el conjunto de estrategias para mitigación y adaptación que las sociedades realizan para reducir riesgos; iv) diseñar instrumentos de política climática eficaces; v) abordar por la homogenización de los programas nacionales e internacionales en busca del desarrollo sustentable. Por último, en la revisión bibliográfica la relación entre el cambio climático y variables económicas principalmente se aborda desde diversas técnicas econométricas estableciendo relaciones unidireccionales entre diferentes escenarios climáticos y variaciones en el producto nacional. Al respecto, Lenton *et al.* (2008) apunta que este método basado en funciones lineales no es adecuado para medir un fenómeno complejo como el cambio climático.

1.2.2 Medio ambiente y equilibrio general computable (EGC)

Siguiendo con el énfasis sobre la política ambiental y económica, los partidarios de esta línea buscan evaluar el impacto económico de una política medioambiental y sus implicaciones sociales, económicas y ambientales. A diferencia del anterior esquema, en el EGC se incorporan diversas variables claves de sustentabilidad en un marco único integrador microfundamentado. Esta técnica nace en 1960 a partir del trabajo de Johansen convirtiéndose en la herramienta líder en la economía intersectorial y nacional en la evaluación de política ambiental (Xi y Saltzman, 2000). La mayor crítica a los modelos de regresión lineal es justamente la falta de argumentos

lógicos en el comportamiento del productor y consumidor. A diferencia de los modelos de relación econométrica causal donde se analizan las relaciones a nivel macroeconómico, aquí se examinan la consistencia del comportamiento a nivel micro.

Como se anuncia en el nombre, el trasfondo teórico descansa en el equilibrio general. De acuerdo con Böhringer y Löschel (2006) el EGC sigue el esquema desarrollado por Walras. En complemento a esta idea, Fujimori *et al.* (2014) apunta que estos modelos siguen los criterios neoclásicos al definir sectores, productos básicos y sector productores de energía, en contraposición de la econometría convencional donde no existe ningún principio teórico.

Debido a la consolidación del equilibrio general como marco referencial de la profesión, se asume que el problema ambiental nuevamente es una externalidad del mercado que perturba el bienestar de la población. Ahora, como existe microfundamentación de los agentes, las políticas energéticas recaen sobre el comportamiento racional. Las funciones de oferta y demanda en el modelo se derivan del comportamiento de productores que maximizan ganancias y utilidad de los consumidores, los precios se determinan de manera endógena y las funciones de producción con frecuencia tipo Cobb Douglas o con elasticidad de sustitución constante, normalmente no tiene restricciones respecto a los insumos.

Ahora, a diferencia del enfoque anterior, es posible medir las repercusiones del problema ambiental no solamente en términos de variables agregadas sino habilita la opción de medir la eficacia de la política en términos de bienestar individual, precios de mercado y asignación de recursos. El esquema posibilita realizar ejercicios de estática comparativa para confrontar una situación previa y posterior a la implementación de política.

Los instrumentos que se utilizan para internalizar el daño ambiental son diversos. Algunos ejemplos son Tang *et al.* (2017) quienes analizan el impacto del modelo energético chino agregando un módulo de impuestos que gestiona el Estado. Babatunde *et al.* (2017) señalan que la metodología de EGC se utiliza principalmente para la evaluación y análisis de problemas asociados a la mitigación, poniendo énfasis en impuesto de carbono, reducción emisiones, energía renovable, eficiencia energética y mecanismos de captura de carbono.

En general, los trabajos apuntan hacia la simulación de impuestos de carbono y sus afectaciones sobre la producción en distintas condiciones, asignando diferentes valores de impuestos y su impacto potencial sobre el producto (por ejemplo, Li y Masui, 2019). En otros

se simulan reembolsos hacia el hogar, recorte a impuestos sobre la renta de las empresas e impuesto al consumo (Takeda y Arimura, 2021), mientras algunos analizan el tránsito hacia tecnologías renovables en el sector energético y su impacto sobre los hogares y nivel de emisiones (Gelan, 2018). En general los resultados muestran que las políticas energéticas e instrumentos ambientales reducen el impacto ecológico en detrimento de la producción.

1.2.3 Consumo energético, emisiones y crecimiento económico

Esta línea es quizá la más abordada en el campo de la economía ambiental. La relación entre consumo, emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y producto per cápita descansa en la Curva de Kuznets¹². El debate en torno a este argumento aparece después de la publicación de Grossman y Krueger (1995) quienes vincularon el desgaste ambiente con el crecimiento medido en términos por habitante. De manera gráfica, esta relación toma una forma de “U” invertida debido a tres momentos: en el primero (ascenso de la contaminación y bajo nivel de PIB pc) es resultado de un efecto despegue del crecimiento. El segundo tramo de la “U” invertida (máximo nivel de contaminación y crecimiento intermedio del ingreso individual), es consecuencia del efecto estructural de la economía y la tercera etapa (nivel decreciente de contaminación y alto ingreso) se debe a la configuración institucional, regulatoria y tecnológica para mitigar el daño ambiental.

El crecimiento económico conduce inevitablemente hacia un incremento de la contaminación. Desde las narrativas internacionales de sustentabilidad, es posible compatibilizar el crecimiento económico y la reducción de emisiones de efecto invernadero asumiendo la probabilidad de transformaciones estructurales en el largo plazo. La internalización de las emisiones posibilita un crecimiento compatible con las perspectivas de desarrollo sustentable.

Las técnicas de validación empírica de la relación descrita corresponden principalmente a métodos econométricos, siendo el trabajo de Karft y Kraft (1978) pionero en sustentar el vínculo entre las variables a partir de la causalidad de Granger. Debido a las variaciones de las técnicas econométricas y no contar con microfundamentos, la evidencia empírica muestra resultados diversos a raíz de la selección de variables, periodicidad, fuentes y sesgo de información. El punto de convergencia en los análisis es la unidad de observación pues se

¹² Esta relación es la causalidad más utilizada en las estadísticas comparativas internacionales.

considera al país o conjunto de países como referencias. En la revisión de literatura, existen 3 intereses de investigación:

El primero, casos empíricos donde se pone a prueba la hipótesis, como Halicioglu (2009), quien para Turquía ve una evaluación positiva, mientras Galli *et al.* (2012) señalan que en China e India esta relación no se cumple. El segundo caso es la innovación econométrica para mejorar los resultados, situación visible en Omri (2013) quien establece tres ecuaciones estructurales para considerar los niveles de CO₂, crecimiento y consumo energético endógenas al sistema; Saidi y Hummani (2015) utilizan datos panel para capturar la heterogeneidad y retirar el supuesto de linealidad, al igual que Churchill *et al.* (2018), quienes consideran a los datos panel como la técnica más innovadora y justifican el método adecuado para capturar dependencia en las unidades de corte transversal, mientras Dogan e Inglesi (2020) recuperan los mínimos cuadrados totalmente generalizados.

El tercer caso corresponde a cambios en las variables dependientes. En lugar de considerar las ECO₂, se opta por la huella ecológica debido a su carácter sistemático tal y como señalan Destek *et al.* (2018). Mientras otros autores amplían el conjunto de variables explicativas más allá del crecimiento económico, siendo Destek y Sarkobie (2019) quienes proponen el desarrollo financiero al igual que Shahbaz y Sinha (2019) quienes plantean la necesidad de introducir índices de corrupción, estabilidad política, educación, investigación y desarrollo, entre otras en futuras investigaciones.

1.2.4 Regulación ambiental, competitividad e innovación

El punto de partida es asumir el problema medioambiental como un elemento externo al sistema de tal forma que los hacedores de política son capaces de identificarlo y deciden implementar una serie de medidas para reducir sus repercusiones. Es importante recordar que, desde la visión ambientalista de la economía, todo instrumento de política debe generar incentivos, evitar la distorsión de los precios y ser eficiente para retornar a la situación de bienestar previa.

La problemática fundamental en este enfoque radica en la elección que toman los reguladores. Desde una perspectiva de sustentabilidad, se busca de manera simultánea la reducción de ECO₂ sin afectar la competitividad gracias a los incentivos a la innovación. La decisión de las autoridades regulatorias recae sobre dos elementos: 1) Definir en qué medida y bajo qué condiciones la regulación ambiental ejerce efectos negativos o positivos sobre la

competitividad. 2) Identificar la capacidad de respuesta por parte de las empresas frente a la regulación.

Los trabajos seminales que recurre la literatura especializada es Porter (1991), Porter y Van der Linde (1995) quienes establecen una relación causal positiva entre la regulación y el proceso inventivo. Este resultado no se da inmediatamente sino es una respuesta de largo plazo. En la primera fase, la empresa incurre en pérdidas mientras en el tramo largo se vuelve competitiva en su estructura de costos gracias a las innovaciones traducidas en ganancias de productividad.

Es relevante señalar que la regulación se ve como un costo en que incurre la empresa, pero a su vez se traduce en incentivos. Un trabajo clásico en el tema de Jaffe y Palmer (1997), quienes indican que este proceso creativo puede generarse de manera débil si las innovaciones son costosas y se dan en rubros de poca importancia; de manera diametral, son fuertes si la innovación se traduce en una estructura de costos bajos y vuelve competitiva a la firma.

Similarmente a la línea de investigación anterior, la verificación empírica recae sobre el método de estimación. Ahora, la unidad de análisis se aborda desde la perspectiva sectorial, a nivel de firma y conjuntos de empresas con perfil en común. En la revisión bibliográfica parece existir un descenso de investigaciones actuales en esta corriente en comparación a la Curva de Kuznets cuya agenda de investigación es vigente. A pesar de ello, es posible identificar dos rasgos en la literatura asociada al efecto de la regulación.

Un grupo de autores están en desacuerdo con el vínculo positivo entre competitividad y regulación. Iraldo *et al.* (2011) apuntan que la relación entre política medioambiental, desempeño ambiental y competitividad no es clara y puede variar dependiendo de las características de las empresas o sectores, mientras Cohen *et al.* (2018) van más atrás pues en su revisión de 103 trabajos afirman la imposibilidad de tener una expresión detallada de los instrumentos de regulación ambiental convirtiéndose en una caja negra. Wang *et al.* (2019) validan la hipótesis siempre y cuando el instrumento regulatorio no se costoso. Ramanathan *et al.* (2015) acusan la excesiva reglamentación motiva la salida de empresas a países con menores evaluaciones ambientales. Un trabajo posterior del mismo autor, Ramanathan *et al.* (2017), señalan rigidez de la empresa en el corto plazo por los altos costos financiero.

El segundo conjunto de autores reafirma la valía de la relación, aunque bajo ciertos matices. He *et al.* (2020) señalan que no es verificable de manera directa sino debe utilizarse una variable proxy muy específica de la innovación, en su caso, el régimen de propiedad intelectual. Para Wang *et al.* (2019) se válida la relación en el corto plazo considerando como innovación los mecanismos en el mercado de carbono implementado en China, mientras Santra (2017) encuentra de manera robusta y sin reparo una relación positiva entre regulación e innovación medioambiental para el conjunto de países emergentes BRICS.

1.2.5 Impuestos ambientales

Como se ha señalado de manera general, los instrumentos de política ambiental en todo momento buscan internalizar las repercusiones del cambio climático. A su vez, las medidas buscan preservar el perfil competitivo de la economía. Dentro del marco regulatorio los impuestos ambientales son los preferidos en el abordaje teórico.

El punto inicial es considerar el medio ambiente como un bien público. Para evitar que suceda el caso acuñado por el matemático William Foster Lloyd (1833) y popularizado por Garret Hardin (1968) como “la tragedia de los comunes”, las autoridades regulatorias imponen un impuesto a quien exceda en la explotación de los recursos y afecte el bienestar común. Ante ello, surgen tres posturas.

La primera planteada por Ronald Cause (1960) contra la implementación del impuesto debido a que distorsiona el sistema de precios, reduciendo los incentivos para los productores. Como alternativa, el autor sugiere que en lugar de un gravamen del Estado deberían definirse los derechos de propiedad sobre los bienes públicos como el agua y petróleo. De esta manera, la gestión privada garantiza la asignación óptima de los recursos, eliminaría las externalidades ambientales, evitaría distorsiones en el precio monetario y mantendría el bienestar social e incentivos en la producción. De acuerdo con Jeannot (2020), con el teorema de Cause inicia la gran oleada de privatizaciones de los bienes naturales y servicios energéticos bajo la idea de eficiencia y eficacia del capital privado.

La segunda postura identificable gira alrededor de la asignación eficiente del impuesto ambiental. No interesa lo que se realice con los recursos recaudados sino se privilegia conservar los niveles de eficiencia y bienestar social. Las preguntas que se realizan los investigadores interesados son ¿qué tipo de impuesto es el adecuado para conservar los incentivos a la

producción? ¿de qué manera pueden coadyuvar el impuesto ambiental con el resto de los impuestos existentes? ¿en qué porcentaje debe aplicarse? Como ejemplo se tiene a Schlegelmilch *et al.* (2016) quienes apuntan que los impuestos deben aplicarse de manera homogénea a las emisiones, no sólo de CO₂, para garantizar eficiencia productiva. Shava (2019) advierte que los impuestos afectan el costo de capital, mientras Wesseh y Lin (2016) para China y Mooji *et al.* (2018) para India estiman los valores óptimos en el impuesto ambiental. Finalmente, Li y Yin (2019) sugieren la conveniencia del impuesto verde, sin embargo, la eficacia económica se logra siempre y cuando el impuesto verde sustituya los impuestos sobre el capital.

La tercera postura corresponde la forma de crear sistemas recaudatorios a partir de los impuestos para impulsar la creación de infraestructura pública que mitigue el daño ambiental. En el debate actual, los países deben consolidar un sistema fiscal que permita los ingresos suficientes para implementar la transición. Bajo una idea de compensación, se considera que el daño ambiental hacia la población afectada puede restituirse convirtiendo el dinero en infraestructura. La expresión más recurrente de este mecanismo son los mercados de carbono.

En efecto, los países que exceden el nivel de emisiones contaminantes pueden comprar los permisos no utilizados de países generadores de menor contaminación. Con este dinero, las naciones recaudan ingresos para remediar los daños que causa las manifestaciones climáticas y, en el ideal, crear infraestructura, invertir en tecnologías renovables, entre otras posibilidades, para saldar su deuda ecológica y desarrollar capacidades de adaptación y mitigación frente al cambio climático. Algunos ejemplos son Elshamy y Ahmed (2017) quienes analizan los impuestos al carbono e impuestos a los residuos como elementos importantes en la política fiscal verde para el caso europeo, al tiempo que Shemelev y Speck (2018) realizan su estudio para Suecia, una de las primeras naciones en implementar impuestos ambientales, detectando que los impuestos al carbón y gasolina contribuyen al plan financiero del país que permitió desarrollo tecnológico, mientras Shipalana (2020) argumenta el potencial de impuestos verdes para África permitiría canalizar inversión hacia infraestructura verde y energías renovables.

1.2.6 Contabilidad ambiental

Bajo la teoría neoclásica del productor, se desarrolla una corriente que toma auge en los últimos años de acuerdo con la revisión bibliográfica. Siguiendo el principio de sustentabilidad

empresarial es necesario que las empresas, bajo una lógica de maximización de beneficios, incorporen a sus estados contables los daños ambientales. Esta herramienta permite proporcionar una visión amplia de los impactos ambientales de un proyecto productivo. Las principales preguntas que se lograron identificar fueron ¿de qué manera la contabilidad ambiental permite estimar los impactos ambientales? ¿cómo la contabilidad ambiental reduce el riesgo climático? ¿En qué forma la contabilidad ambiental contribuye a la responsabilidad social de la empresa?

Son dos objetivos que guían esta temática. El primero examina las afectaciones ambientales en las actividades empresariales de la organización, asumiendo que los proyectos de inversión sufren modificaciones en su rentabilidad. La decisión de invertir debe examinar la tasa de retorno, los beneficios a la sociedad, las afectaciones a la salud de los ecosistemas y el precio de los insumos ambientales. En otros términos, este espacio de análisis utiliza principalmente el esquema de costos-beneficios para determinar la viabilidad de una inversión en términos de sus ingresos y afectaciones ambientales bajo la idea de sustentabilidad empresarial.

Para ello, es necesario contar con una serie de indicadores como el valor monetario aproximado de cada bien natural, la eficiencia energética de cada insumo, el costo monetario de agotamiento, de la degradación y la tasa de depreciación natural. Se asume la naturaleza como un activo fijo de la empresa. Al respecto, puede analizarse el trabajo de Beer y Fried (2006) quienes justifican introducir el costo ambiental en la estructura de costos de la empresa para determinar sus impactos sobre la producción. Para lograr el cometido es necesario un inventario de costos y valores económicos de los recursos. Mientras O'Dwyer (2011) apunta en el papel de la información para garantizar la responsabilidad de la empresa, a la vez Mata *et al.*, (2018) puntualizan en que, además de las ventajas para la producción, este esquema reduce los riesgos de producción de la empresa, al tiempo que Somjai *et al.* (2020) encuentran beneficios de las pequeñas y medianas empresas asiáticas de la contabilidad ambiental en términos de innovación.

El segundo enfoque, además de validar los aportes anteriores, agrega una posibilidad. La contabilidad ambiental conduce a la sustentabilidad empresarial y creación de conciencia ambiental entre la población. En efecto, se construye una imagen del empresario responsable

con el ambiente a partir de una serie de indicadores sustentables para ganar espacio en los mercados y volver compatible su producto con las exigencias de los consumidores.

En esta línea se ubican Chung y Cho (2018) argumentando que la contabilidad ambiental permite reconfigurar los objetivos de la empresa hacia la responsabilidad social, derechos humanos y biodiversidad, al tiempo que permite transmitir esa información al precio de las acciones en las bolsas de valores y ser beneficiado. Así, puede encontrarse en la literatura la relación entre las cuentas ambientales y el desempeño en el valor de las acciones de compañías de sectores específicos. Solovida y Latan (2017) examinan la relación entre las certificaciones ISO (significado ISO) ambientales y el precio de las acciones en la Bolsa de Valores de Indonesia, mientras Shabbir y Wisdom (2020) encuentran una relación positiva entre la responsabilidad ambiental empresarial y el rendimiento financiero de las acciones. Por último, en una visión crítica, Lehmana (2017) apunta la incompatibilidad de valores ambientales y los valores empresariales, convirtiéndose en un criterio de publicidad.

1.3 Nuevos aportes teóricos: la economía ecológica

El apartado previo muestra la lógica de la economía neoclásica para explicar la compleja relación entre economía y medio ambiente. La mayoría de reflexiones y áreas de estudio conservan la mecánica del proceso productivo. La idea sobre las externalidades, equilibrio, optimización económica, ausencia de balances energéticos y comportamiento racional han sido puntos de constante crítica por parte de los partidarios de la economía ecológica.

Este enfoque se institucionaliza a partir de la creación de la International Society of Ecological Economics en 1989 cuyos fundadores fueron Dick Norgaard, John Proops, Charles Perrings, Joan Martinez-Alier, Peter May, John Gowdy, Bina Agarwal, Marina Fischer-Kowalski, Sabine O'Hara, y Clovis Cavalcanti (ISEE, 2021). Sin embargo, en la revisión de la literatura es posible comprobar que las bases intelectuales y pioneros de este movimiento se encuentran más allá del siglo XX. De acuerdo con Mergal-Melgara y Hall (2020), es la escuela fisiócrata de la economía, en el siglo XVIII, el primer enfoque que vincula la riqueza material con la riqueza de las naciones (tal como se presentó en el primer apartado de este capítulo), reconociendo la naturaleza biofísica del proceso productivo.

Más adelante, transcurriendo el primer tercio del siglo XIX, el desarrollo de la termodinámica gracias al trabajo de Sadi Carnot (1824) “*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines*” provocó un cambio en las ciencias basadas en la filosofía de René Descartes y la física de Newton. El descubrimiento de la entropía, como la pérdida de energía después de un ciclo de trabajo, evidenció que cualquier sistema dentro del planeta estaba sujeto a esta ley energética.

Las primeras reflexiones acerca de la relación física y energética de la naturaleza sobre la economía fuera del determinismo marginalista no fueron pensadas precisamente por economistas. Dentro de los pioneros se encuentra el sociólogo Patrick Geddes (1854-1932) quien en una serie de conferencias ante la Royal Society of Edinburgh presentó su libro *Analysis of the Principles of Economics* (1885) intentando plasmar el carácter de la economía desde una perspectiva sistemática. Si bien fue admirador de Jevons (Meller, 1994) su crítica se centró en el análisis físico y químico de la economía y la ausencia de relaciones multinivel.

En efecto, para Geddes la principal característica de la sociedad era asemejarse a una gran maquina compleja que absorbe y disipa energía. De tal forma, el sistema económico se comporta de manera similar a un sistema biológico. Al existir organismos que tiene la posibilidad de consumir más energía produce simultáneamente mayores residuos. Por lo cual, en una sociedad que genera gran cantidad de artículos de lujo el nivel de residuos incrementa.

La gran maquinaria social fue vista por el sociólogo escocés como un organismo con la capacidad de evolucionar. Esta visión la desarrolló en su obra magna *Cities in Evolution* (1911) donde el desarrollo social y la mejora en la calidad de vida no dependía del desarrollo económico sino del desarrollo cultural de las personas. Frente al optimismo de despliegue tecnológico y la generación de riqueza, la evolución cultural permitiría dominar a las maquinas (Chabard, 2012).

Bajo la misma idea de la economía como un sistema biofísico y evolutivo, el matemático Alfred Lotka (1880-1949) retomó el principio de Boltzmann para señalar que la evolución del mundo orgánico era una lucha por la energía. Este concepto daría pie a su definición de biofísica (1925). Sin embargo, fue crítico al papel de la entropía en el proceso de evolución. En *Natural selection as a physical principle* (1922) apunta que la entropía en un sistema abierto no es capaz de explicar el curso de los acontecimientos sino son los principios de selección y evolución. En otro aporte, *Contribution to the energetics of evolution* (1922a) señala que la evolución hace crecer el flujo de energía del sistema. Utilizando como ejemplo las cosechas en Estados Unidos,

de acuerdo con el autor, para incrementar el rendimiento agrario no era necesario acelerar la masa energética sino la velocidad de ésta.

Otro de los grandes pioneros que influenció el estudio de los factores biológicos y la economía es el químico Frederick Soddy (1877-1956) cuyo trabajo seminal es *Wealth, Virtual Wealth and Debt* (1926) establece los principios que relacionan la economía y el mundo energético. En un mundo termodinámico, la riqueza de las naciones es la energía, pero no de cualquier tipo. Para el Premio Nobel 1921 era importante identificar la energía que genera riqueza. Por lo cual, la opulencia o pobreza en el planeta es sinónimo de escasez o abundancia de la energía disponible para el trabajo (Kauffman, 1986). Sus preocupaciones para el desarrollo de la humanidad era el papel de la ciencia y tecnología para desarrollar nuevas fuentes energéticas. Como señala Trenn (1979), el empeño de Soddy también fue el impulsar la energía atómica como opción viable de la sociedad para la sobrevivencia.

Un referente de la integración sistemática de la economía y ecología es Karl William Kapp (1910-1976) quien argumentó que los procesos económicos sólo pueden explicarse desde la interacción dinámica de sus partes. De acuerdo con Luzzati (2005) este economista integró la visión sistemática gracias a la influencia de Veblen, Clark y Polanyi. Por tanto, su obra reviste (1966) una crítica la forma tradicional de los problemas ambientales vistos como “externalidades” y lo cambia por el término “costos sociales”. Para el autor, la actividad económica generaba ganancias privadas mientras que los daños a terceros como la contaminación eran sociales. En consecuencia, una economía capitalista sin regulación generaría altos costos sociales. En su trabajo *Economic planning and Freedom* (1950) insiste en un plan internacional de desarrollo que considere los costos sociales de largo plazo debido a que, en países pobres, las actividades privadas generan una gran cantidad de miseria y pobreza. Gerber (2016) reconoce estos intentos de Kapp como un nuevo paradigma económico universalmente aceptable.

Dentro de la revolución del pensamiento aparece la obra de un economista brillante como fue Kenneth Boulding (1910-1993). Su vida académica puede analizarse en dos aristas. La primera estuvo constituida por una vasta obra de artículos y libros dedicados a diversos tópicos de la economía. Otra gran parte de su pensamiento fue dedicado hacia la crítica de la economía neoclásica y la ecología. De acuerdo con Carpintero (2012), una plática con Robert Park generó un cambio radical en el economista y despertó su interés en la ecología y evolucionismo.

En su trabajo *Earth as a space ship* (1965), considera que la tierra debe convertirse en una nave espacial para escapar de los problemas que ha generado el ser humano en el entorno físico, ecológico y social. La especie humana estaba acostumbrada a un espacio tan inmenso que sus residuos no eran problema. En los tiempos modernos, la sociedad se enfrenta al problema de la entropía creciente. De esta manera, la posibilidad de supervivencia está determinado por la capacidad de generar procesos productivos que recicle en su totalidad los insumos naturales. Para ello, el esfuerzo científico y tecnológico debería estar en alto nivel para reciclar más no en manos de las clases altas que han generado gran cantidad de residuos. Su mensaje también recalca sobre los economistas a quienes acusa de tener estructuras teóricas ingenuas a la luz de la realidad.

Su pensamiento, al igual que del resto de autores presentados, fue respondiendo a las necesidades históricas. Efectivamente, frente a la crisis energética del petróleo señala en un artículo (1974) que los economistas deberían percatarse de los cambios estructurales que produciría el fin de la época de combustibles económicos. Al mismo tiempo, sus ideas fueron formalizándose en un cuerpo teórico propio. Su libro *Ecodynamics: A New Theory of Societal Evolution* (1983) representa un espléndido trabajo sobre la dinámica de sistemas afirmando que la evolución del universo se divide en tres etapas: prebiológica, evolución biológica y social. Desde esta postura, la sociedad puede comprenderse bajo las leyes de la evolución.

Un economista con potentes críticas hacia la economía neoclásica es Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994). Antes de su obra cumbre, el economista de origen rumano fue crítico hacia la representación de las funciones de producción Cobb-Douglas (1966) y su imposibilidad de incorporar los recursos naturales en el análisis. Su obra cumbre *The Entropy Law and the Economic Process* (1971) refleja las implicaciones de la entropía sobre el proceso económico. Su análisis incorpora en la matriz de variables de flujos y stock la circulación e influencia de los recursos naturales. Asimismo, manifiesta la irreversibilidad de la economía por causa de la pérdida energética. En esta misma obra, propone la cuarta ley de la entropía, señalando que la energía no sólo se dispersa en forma de calor y reduce su disponibilidad sino también sus propiedades.

En su obra, *La décroissance: Entropie, écologie, économie* (1977) define el término de bioeconomía para destacar el origen biológico de los procesos económicos. Su agenda de acción para lograr una bioeconomía se centra en el cambio de hábitos de consumo, orientar la

producción de bienes con mayor durabilidad y reducir el gasto en el sector militar. Más adelante se abordará sobre la obra de este economista con mayor detalle con el fin de resaltar el papel de la entropía.

La economía ecológica representa un movimiento académico que aborda las múltiples aristas de la relación naturaleza-economía. Entre otros aspectos, se critica la visión estática y determinista de los procesos económicos sobre la dinámica natural y social. Como se hizo referencia en el apartado correspondiente, el enfoque neoclásico basa su validez sobre la verificación empírica de los pronósticos más no en el realismo de sus postulados.

La compleja situación climática y ambiental hace imposible sostener el reduccionismo analítico como una economía de equilibrio y requiere comprender que el actual paradigma energético es resultado de las condiciones históricas de consumo, la estructura productiva y la desigual acumulación de la riqueza. La economía ecológica trae de nueva cuenta la relación de la economía con sus bases materiales y la perspectiva social e histórica. Desde esta óptica, la sociedad no es resultado de una agregación de comportamientos racionales ni son agentes abstractos reducidos a una mecánica de optimización matemática sino regresan a ser individuos y personas que se encuentran en una encrucijada por el actual esquema de desarrollo.

Sobre la concepción del sistema económico, es primordial para la economía ecológica considerarlo un sistema abierto con interrelaciones con el resto de sistemas fuera del determinismo económico, reconociendo que las leyes económicas son parte de un conjunto de reglas que coadyuvan con las naturales y las que rigen los fenómenos sociales; asimismo comprender que se trata de procesos no lineales y dinámicos cuyas técnicas empíricas requieren superar las herramientas tradicionales que se utilizan frecuentemente en la economía. Como señalan Moran y Ostrom (2006) partir de esta visión es posible comprender los efectos de los sistemas sociales sobre el medio ambiente y situar al ser humano como parte del complejo espacio, como personaje más no como superior al resto, intentando romper con la idea aristotélica que somete a la naturaleza a proveer únicamente lo que el ser humano requiere.

Referente al último señalamiento, se atiende la naturaleza en sus múltiples expresiones y no se reduce al término monetario. Con ello, los bienes naturales dejan de ser visto como capital físico sujeto a la escasez donde la asignación óptima se determina en el mercado. Se recupera la complejidad natural como espacio de reproducción y vida de miles de especies, en

su carácter social como creador de símbolos culturales y sociales mientras en lo económico se abandona la idea de viabilidad económica como criterio productivo.

Es así con la influencia de economistas, biólogos, químicos, sociólogos entre otras disciplinas que la economía ecológica posee una plataforma intelectual de más de un siglo de recorrido, manifestando claramente la necesidad de reconsiderar la mayoría de modelos abstractos de la economía. Para Constanza (1996) es fundamental el análisis multidisciplinario, inclusive un cambio epistemológico y ontológico del método de análisis respecto al método positivista lógico, tal como señala Spash (2012) que permita la pluralidad. Sin embargo, se debe tener cuidado con los espacios de difusión. Melgar-Melgara y Hall (2020) acusan que la economía ecológica en su afán del pluralismo metodológico está olvidando sus raíces biofísicas, termodinámicas y sociales.

A continuación, se realiza un análisis de los principales enfoques en esta corriente del pensamiento con el fin de explorar el más conveniente para el desarrollo de esta tesis.

1.3.1 Decrecimiento y desmaterialización

A partir de las preocupaciones acerca del cambio climático surgen diversos especialistas quienes señalan el alto costo en términos ambientales del crecimiento económico. Sumado a ello, desde la teoría económica existe un optimismo que apunta a la convergencia de las naciones del mundo hacia un mismo nivel de desarrollo gracias al sendero planteado por Rostow (1960). Es así como una de las grandes aspiraciones de la modernidad económica es alcanzar las tasas crecientes y sostenidas del producto de los países industrializados, principalmente reflejado en grupos de países emergentes, por ejemplo, los BRICS, cuyo rasgo esencial fue contar con las condiciones idóneas para realizar el alcance. La búsqueda del mismo objetivo por parte de todas las naciones del mundo presionaría en extremo la disponibilidad del mundo energética y material del mundo.

Frente a esa posibilidad, surge una corriente de estudio denominada decrecimiento. Son dos las grandes inspiraciones científicas. El trabajo de Georgescu-Roegen (1971), como se ha señalado y que se hará un análisis más detallado en secciones adelante, plantea el límite natural de los procesos económicos: la entropía. A diferencia de los modelos neoclásicos donde no existe límites energéticos, el mundo natural muestra claramente la equivocación de esta consideración. En concordancia, el trabajo de Daly (1971) visualiza los límites de la economía estacionaria, al tiempo que Daly y Cobb (1989) exhiben las presiones generadas por el capitalismo guiado por lógica del crecimiento sobre las comunidades.

Dentro de las definiciones más populares se encuentra Latouche (2010) quien apunta el decrecimiento como un proceso voluntario negociado a nivel institucional para reducir el consumo energético hasta niveles sostenibles. Esta definición vincula la calidad de medio ambiente con el bienestar humano gracias a un entorno menos destruido por las actividades humanas.

Ligar el decrecimiento, expresado en reducción del producto nacional, y el bienestar humano, ha generado controversias entre aquellos que señalan que no existe un vínculo entre ellos. Por lo cual, disminuir el crecimiento económico no tendría ninguna implicación sustancial [por ejemplo, Koch *et. al.* (2017)]. Mientras, del otro lado de la postura, defienden una acertada relación entre ambas variables, aunque reconocen la dificultad debido a los cambios sociales, económicos, políticos, culturales y tecnológicos que requiere un paradigma de esta naturaleza, tal como señala Büchs y Koch (2019).

Por otra parte, autores consideran la idea del decrecimiento buena iniciativa a pesar de sus vacíos analíticos. Por ejemplo, D'Alissa y Kallis (2020) justifican la inexistencia de una teoría del Estado que permita explicar cómo, por qué y en qué condiciones en las que podría producirse los cambios a nivel sistemático. Weiis y Cattaneo (2017) identifican en su revisión bibliométrica que el tema está diseñado para naciones desarrolladas. En efecto, al requerir una plataforma institucional para transitar hacia un estadio negociado entre las partes, pareciera que los países líderes del mundo se encuentran con las posibilidades de transitar democráticamente al objetivo común, además de contar con recursos financieros para reducir las vulnerabilidades del cambio climático. En el caso de países de baja y media industrialización, se requiere del crecimiento para hacer frente a los gastos gubernamentales y afrontar las condiciones de pobreza y desigualdad.

En una visión pesimista, autores como Foster *et al.* (2011) y Cosme *et al.* (2017) consideran que la génesis del capitalismo nunca permitiría que desaparecieran los incentivos para seguir generando mercancías. Al tiempo que Marcos (2017) apunta que este esquema de desarrollo occidental ni siquiera tiene implicaciones sobre la cosmovisión de las sociedades periféricas de América Latina.

En sintonía, la desmaterialización sigue una línea similar de análisis. De acuerdo con Bunker (1966) en el mundo no importa que la cantidad relativa de recursos disminuya como resultado de la eficiencia sino es la magnitud absoluta la que realmente interesa. Contrariamente

al pesimismo, Tibbs (1992) apunta que la desmaterialización es un factor favorable para el desarrollo de la sociedad. El mismo Bunker apunta una falacia en su análisis porque el progreso técnico en la utilización de insumos ambientales mejora la eficiencia del consumo energético pero las viejas tecnologías e insumos contaminantes coadyuvan, por lo cual, las presiones ambientales incrementan.

1.3.2 Metabolismo social y sistema socioecológico

La comprensión de los fenómenos económicos, sociales y ambientales requiere de un espacio analítico que permita la integración de cada uno de ellos respetando sus características. Con frecuencia se acude a los Objetivos del Desarrollo Sostenible señalando las políticas que podrían encausar la relación humano-naturaleza hacia la sustentabilidad dejando grandes vacíos sin especificar, por ejemplo, los agentes de la transformación, las relaciones causales a que hacen referencia y las implicaciones al espacio.

De esta manera aparece el concepto metabolismo social que, de acuerdo con Infante-Amate *et al.* (2017), refiere al conjunto de herramientas para comprender el comportamiento físico de los procesos económico. Este término aparece como análogo al concepto de la biología para dar cuenta de los diversos procesos materiales y energéticos que acontecen al interior de la sociedad cuya particularidad es la dinámica. Toledo (2013) atribuye la primera aparición en la economía en la obra de Karl Marx. El metabolismo aparece como un enfoque integrador que permite comprender la dinámica de las relaciones sociales dentro de la naturaleza, partiendo del principio que cualquier sistema social está dentro del sistema ecológico, por lo cual, las leyes de la naturaleza coadyuvan con las leyes de los fenómenos sociales, históricos y culturales. La idea sistemas socio-ecológicos considera el medio ambiente como un espacio abierto donde el ser humano intercambia materia y energía con la naturaleza para poder existir. De acuerdo con Toledo (2016) durante este proceso surge una doble conceptualización: por un lado, los seres humanos socializan parte de la naturaleza y por otro naturalizan a la sociedad al extender sus fronteras biológicas. Por lo anterior, siguiendo al autor, existen 5 fenómenos metabólicos: la apropiación, la transformación, la distribución, el consumo y el desecho. En un extraordinario trabajo, Reina (2013) realiza una clasificación de las distintas nociones y variantes que retoma, desde la ecología política, el concepto de metabolismo (por ejemplo, metabolismo urbano, industrial, rural, agrario, entre otros), coincidiendo en el interés de cada uno de ellos en estudiar los flujos de energía al interior de la sociedad y sistemas ecológicos.

La falta de comprensión acerca de la dinámica de los ecosistemas es el principal problema del actual desarrollo civilizatorio, pues se asume una idea lineal y armónica de interacciones donde el tiempo social se empareja al tiempo ecológico. En efecto, como señala Reboratti (2002) la escala, tiempo, espacio e impactos de la actividad social son totalmente diferentes a las necesidades naturales a tal punto que cualquier sociedad tiene la falsa creencia que puede acceder al uso del ambiente y que el tiempo de recuperación es equivalente al lapso de la actividad efectuada. Es justamente la noción de metabolismo que rompe con esta interpretación debido a la existencia de factores que irrumpen en la distribución de los flujos.

Entre ellos se puede encontrar los patrones culturales e históricos que determinan los balances energéticos y el tipo de respuestas a los cambios dentro del sistema que varían entre cada cultura energética. Este último concepto es relevante dentro del metabolismo socio-ecológico. Desde esta perspectiva se plantea los espacios sociales, culturales y de comportamiento de los individuos en busca de identificar cómo interactúa la sociedad con sus dimensiones materiales y técnicas. Este marco analítico ofrece múltiples elementos, desde la cultura y estilos de vida, para conceptualizar el comportamiento y los componentes sociales que interactúan con la estructura de consumo energético en tiempos y espacios particulares (Stephenson *et al.* 2010).

Evaluar la transformación socio-ambiental requiere de categorías que permita medir los mecanismos que se mueven al interior. Toledo (2008) reconoce la dificultad de construir un marco conceptual y una metodología con base en el metabolismo social. No obstante, es posible identificar el Material and Energy Flow Analysis como principal instrumento empírico. De acuerdo con Islam y Huda (2019) es la metodología más utilizada en la ecología industrial para analizar la entrada y salida de cada material en todo el sistema con el fin de gestionar los residuos, mientras García-Guaita *et al.* (2018) apuntan su pertinencia para medir la sustentabilidad de las ciudades en términos de energía.

1.3.3 Movimientos sociales, justicia y ética ambiental

Desde la economía ecológica se abre la discusión acerca de las desigualdades en el actual esquema energético que resulta excluyente para diversas partes de la población. Este marco permite abordar los temas de acceso y disponibilidad de los servicios energéticos como punto central del desarrollo cultural. El actual desarrollo industrial conducido por gran consumo de carbón y combustibles fósiles ha detonado niveles históricos en la degradación ambiental

afectando de forma diferencial a los estratos sociales. Siguiendo a McCauley (2018), en el mundo son distinguibles al menos tres formas de exclusión: seguridad energética al no poder proveer los elementos mínimos para la reproducción biológica y cultural de las personas; pobreza energética al dedicar gran parte del ingreso familiar a la compra de servicios energéticos; y vulnerabilidad frente a las adversas consecuencias del cambio climático, afectando a los más pobres ante la crecida de los mares, tornados, maremotos, sequías e infertilidad de la tierra.

Otro elemento identificable en la literatura es la lucha contra las formas de mercantilización de la naturaleza a raíz de los proyectos de inversión instalados en comunidades indígenas. Diversas inversiones llegan a consolidarse con frecuencia en zonas abundantes en bienes naturales comerciables y de alto precio en los mercados internacionales de materias primas, donde la población es predominantemente de origen rural. Las comunidades al considerar la biodiversidad cultural parte esencial de su organización estallan en movimientos en defensa de su patrimonio. Así, las problemáticas ambientales, conflictos territoriales e injusticias sociales pueden asociarse a la mercantilización de la naturaleza, exigiendo que los proyectos sociales se cumplan bajo el principio de justicia ambiental.

Los riesgos asociados a la mercantilización de la naturaleza tienen manifestaciones diversas. En los últimos años la financiarización del medio ambiente ha sido uno de ellos. De acuerdo con Randall Wray (2008) diversos elementos de la naturaleza han entrado a la esfera financiera al ser redituables en el corto y largo plazo. Bruckmann (2016) atina al señalar que el proceso de financiarización convirtió los bienes naturales en commodities y además trajo consigo la expansión de empresas nacionales y globales que operan en el sector de la minera, petroleras y producción de alimentos.

La minería a cielo abierto, los monocultivos, extracción de petróleo a través del fracking, entre otros, son consecuencias lamentables de considerar la naturaleza como objeto de ganancias extraordinarias y que provoca incesantes luchas de las comunidades por sus territorios. El enfoque de justicia ambiental toma parte en el reconocimiento de los afectados y establecimiento de procedimientos para detener la situación. Por tanto, las comunidades construyen una cosmovisión propia del desarrollo fuera de los aspectos modernistas que sólo ha generado mayores problemas.

Contra la visión mercantil de la naturaleza aparece la ética ambiental. Su objetivo es revertir la noción antropocéntrica hacia los bienes y servicios naturales abandonando la idea que establece la preservación de los ecosistemas siempre y cuando sean útiles para los fines del ser humano. En respuesta, la ética ambiental no antropocéntrica refiere a la consideración del medio ambiente susceptible a criterios morales más allá de la valoración subjetiva de los individuos vinculados a un fin particular.

Los trabajos pioneros en esta disciplina remontan a Aldo Leopold (1939) y la ética de la tierra como principio de la evolución social, quien además pugna por la concepción del individuo en retroalimentación con el medio ambiente, orientando su comportamiento hacia la cooperación con el resto de sus semejantes en un marco de conciencia ecológica. Otro aporte es el trabajo de Baird Callicott (1984) quien después de un profundo debate filosófico concluye que la naturaleza puede ser objeto de consideraciones morales y posee un valor intrínseco bajo un razonamiento formal, despejando los discursos ideológicos donde el medio ambiente no tiene valor epistemológico por sí-mismo. Rolston III (1982) argumenta que la construcción de una ética ambiental considera la naturaleza no como un agregado inerte, sino es un sistema complejo de múltiples relaciones al interior, a su vez, la capacidad de influir sobre la conducta de los individuos que lo constituyen.

1.3.4 Ecología de los pobres y economía ecológica radical

Continuando con la línea de análisis de las personas excluidas del actual patrón energético, este enfoque de la disciplina reconoce la existencia de crisis económica, social y ambiental que coadyuvan dentro del actual sistema civilizatorio. Frente a esta situación durante los años noventa comenzaron a darse brotes de inconformidad hacia los países pobres acusándolos de no realizar las acciones correspondientes para detener los efectos del cambio climático y propiciar en sus acciones cotidianas grandes cantidades de residuos debido a su falta de “racionalidad” en el uso de los recursos naturales.

Frente a esta situación aparece una crítica por dos senderos que bifurcan, se trata de Ramachandra Guda (1994) y Joan Martínez Alier (1994) con su ecología de los pobres y ecologismo popular. Esta manifestación va contra el argumento de que los ricos son quienes mejor cuidan el ambiente gracias a la maduración de su conciencia ambiental y la actitud política del ciudadano respecto a su entorno. Los dos autores coinciden en que el ecologismo del mundo

desarrollado carece de un arraigo cultural pues se considera de manera superflua, mientras que desde las comunidades indígenas y rurales existe una relación con la naturaleza.

Es decir, para utilizar el término de Daly (1989) existe un imperialismo ecológico desde los países de mayores ingresos respecto al mundo atrasado. Sin embargo, son los países desarrollados quienes han contribuido al mayor nivel de emisiones debido a su liderazgo en el consumo de energéticos. Además, en términos de acuerdos internacionales, son quienes diseñan la elaboración de los puntos de acuerdos cual si el resto de los países fueran igualmente responsables por el daño ambiental. Añadiendo que desde la academia los principales desarrollos de la economía ambiental, que va de la mano con la visión del problema a nivel institucional, se construyen principalmente en naciones desarrolladas.

Desde un punto común y ciertamente divergente por la profundidad de su análisis tanto categórico, epistemológico y metodológico para las sociedades de América Latina, la economía ecológica radical insiste en la necesidad de reconstruir el cuerpo analítico de la disciplina que se orienta hacia las sociedades occidentales que utilizan el mercado como solución del conflicto. Esta línea se orienta hacia el estudio de las sociedades que han construido nuevos paradigmas civilizatorios por la vía campesina y han trabajado en la conformación de un nuevo desarrollo que satisfaga sus necesidades. Las denominadas sociedades post-capitalistas demuestran tener la capacidad de generar relaciones de producción sustentables con respeto hacia la naturaleza, garantizando sus condiciones alimenticias, laborales, espirituales, etc.

Esta ruptura es trascendental en las disciplinas sociales pues resultan de poco interés dentro de los grupos de trabajo, conjugándose con la escasa trascendencia en la generación de política pública. El transitar por el reconocimiento de las comunidades indígenas se ha enfrentado a dogmas académicos desde una epistemología científicista, dogmas culturales al atribuirle inferioridad en la escala social y sobre todo son resultado de un mundo polarizado que ha concentrado la riqueza e incrementado la pobreza, además donde las comunidades rurales e indígenas han sido excluidas sistemáticamente del actual camino hacia el desarrollo.

Los principios analíticos que aborda este enfoque tal como señala Barkin (2012a) descansa en la imposibilidad de asignar valores monetarios a la naturaleza, reconocimiento del metabolismo social y la visión latinoamericana de conceptos tales como justicia social. Se considera como rasgo fundamental el cambio en el actual esquema de desarrollo y dominio

capitalista. En efecto, de acuerdo con Barkin y Lemus (2013) es necesario terminar con la idea que compatibiliza el crecimiento y cierta armonía con el medio ambiente pues en la génesis del capitalismo radica una incompatibilidad originaria.

Este enfoque se considera radical pues extingue la idea de racionalidad económica causante de las múltiples crisis existentes (Barkin, 2012b). Las características de las comunidades en la configuración de un desarrollo autónomo radican en principios poco abordados en el análisis convencional de la economía como el papel de las instituciones comunitarias, cooperación, autogestión y diálogo como plataforma elemental para la construcción de un nuevo camino de desarrollo. Tal como menciona Barkin *et al.* (2020) la economía ecológica radical permite consolidar este tipo de sociedades, mejorando su calidad de vida y conservando sus ecosistemas.

1.3.5 Desarrollo sustentable y ecología industrial

Hasta el momento se ha analizado dos perspectivas del desarrollo. La primera promovida por las instituciones internacionales que se considera el punto de partida del análisis debido a sus severas fallas analíticas y que se convirtió en el referente internacional. Con base en ella, se ha convertido en espacio de análisis preferido de la economía ambiental. El segundo concepto presentado en el apartado previo engendró desde las comunidades rurales e indígenas vinculados a la noción de buen vivir. A grandes rasgos, los proyectos comunitarios logran la satisfacción de los miembros, generan empleo y garantiza la seguridad alimentaria dentro de un conjunto de prácticas de respecto con la naturaleza.

Los rasgos característicos sobre este desarrollo sostenible comparten la misma crítica que realiza la economía ecológica hacia la economía ambiental que se debatieron en apartados previos. En general, se cuestiona la falta de elementos detrás de los mecanismos establecidos que den cuenta para quién y de qué tipo de desarrollo se trata, así como visión optimista acerca que es posible alcanzar una etapa de desarrollo superior siempre y cuando se tenga una visión pragmática acerca de las complejas relaciones entre economía, sociedad y ambiente.

En primera instancia, debe considerarse la economía un espacio finito sujeto a límites energéticos (la reiterada ley de la entropía y la cuarta ley de la termodinámica; ambas detalladas en el siguiente apartado), compuesta por un conjunto de actores con intereses diferenciados. Frente a esto, debe considerarse la economía como la bifurcación de procesos ambientales,

sociales y económicos cuyos límites energéticos son finitos y no están sujetos a la lógica racional de maximización ni al servicio de los medios tal como el enfoque ambientalista. La lógica de reproducción del ser humano depende principalmente del cuidado que realice de los factores bióticos. Por tanto, se plantea un esquema de sustentabilidad energética más no monetaria.

Partiendo de los límites del sistema, sólo queda establecer las pautas de comportamiento. Con base en Daly (1990), el autor plantea que el desarrollo sostenible debe darse a partir de tres elementos: la tasa de extracción de recursos naturales debe ser igual a la tasa de regeneración; el nivel de emisiones igual a la capacidad de absorción natural de los ecosistemas; por último, la explotación de los recursos no renovables sea igual a la sustitución de energías renovables. Ahora, la pregunta que se deriva es acerca de la estrategia para alcanzar estos principios. De acuerdo con la propuesta del autor, son dos vías posibles: i) El papel del Estado como regulador de las practicas bajo estos principios. El problema es la dificultad de organizar a la cantidad de personajes bajo la misma línea y el tiempo que tomaría. ii) La segunda posibilidad es el papel de la ecología industrial en los procesos productivos debido que siguen los mismos principios de sustentabilidad.

Analizando las características de la ecología industrial se bosqueja el proceso económico como el conjunto de la producción, distribución y consumo sin desvincularlo de la dinámica social y biológica. Para integrar las sucesiones, se retoma el concepto de metabolismo ahora de carácter industrial, en el cual, la dinámica productiva se asimila a la naturaleza sujeta a límites energéticos Al respecto, Ayres (1998) considera vital poner énfasis en las entradas, salida, flujos y ciclos de los materiales durante todo el proceso. Mientras Graedel (199) señala que puede saberse los efectos de las actividades humanas sobre la naturaleza a partir del metabolismo industrial. Este último se caracteriza por ser metabólico (integra elementos físicos y químicos y flujos de materiales); energético porque entran elementos que se convierten en residuos; y simbiótico porque intercambia energía con el resto de sistema.

En un aporte más reciente, Graedel y Allenby (2010) apuntan que la ecología industrial sigue los siguientes principios de sustentabilidad energética: i) establece una tasa límite de recursos; ii) asigna el límite permitido de consumo; iii) compara el desempeño actual con el permitido; iv) diferencia la escala de tiempo entre la dinámica económica y social; v) mide la

gravedad de los daños o riesgos latentes; vi) considera el grado de irreversibilidad; vii) busca sanciones en caso de exceder los límites.

Por último, la categoría de metabolismo industrial concibe importante el rol de la tecnología dentro de su definición de desarrollo sustentable. La tecnología tiene las siguientes características: i) incierta (se vive en descubrimientos y experimentación constante); ii) progresiva (principio de evaluación y transformación); iii) analítica (cuantificar sus cambios); iv) acumulativa (requiere conocimientos previos posibles gracias a la trayectoria histórica); v) sistemática (diversas tecnologías en el mismo espacio y tiempo); vi) integrada (es parte de los sistemas naturales, por lo cual está sujeta a las leyes físicas); vii) acelerada (existencia de ciclos tecnológicos).

1.3.6 Termodinámica, entropía y bioeconomía

En el transcurso del texto se ha señalado en múltiples ocasiones la ausencia de elementos del mundo natural sobre la dinámica económica, particularmente la entropía, la segunda ley de la termodinámica. Para una explicación satisfactoria, es necesario reiterar que la construcción epistemológica de la teoría económica en lo general y la economía ambiental en lo particular descansan bajo las leyes que rigen un sistema cerrado. Bajo esta perspectiva, el núcleo económico no tiene interacciones energéticas ni materiales con ningún otro sistema.

Esto deriva en que los choques exógenos son internalizados a través de la primera ley de la termodinámica. En palabras sencillas, la primera ley que rige cualquier sistema cerrado señala que la cantidad μ de trabajo mecánico se transforma en μ cantidad de energía térmica. A esto se debe que, por ejemplo, pensando en términos de equilibrio general, cualquier choque exógeno de oferta del mercado i se traduzca inmediatamente en un ajuste de demanda en el mercado j . En un sistema regido por la primera ley termodinámica, exista la posibilidad de reversibilidad debido a que cualquier fenómeno se traduce en una respuesta de la misma cuantía. Ahora, en términos de energía, no existe mayor inconveniente debido a la ausencia de pérdida en ninguna proporción. Por lo cual, en sistemas cerrados existe un flujo constante energético.

Frente a esta limitante la obra de Nicholas Georgescu Roegen *The Entropy Law and the Economic Process* (1971) identificó dicha restricción analítica en la teoría dominante de la disciplina. Desde esta óptica, la sociedad vive en un mito energético que hace posible la continuidad del proceso económico de manera infinita y sin restricciones que no sean el trabajo,

capital y tecnología. Una forma de superarlo es el papel de la entropía, la segunda ley de la termodinámica. Para ello, de manera sencilla, análoga a la descripción de la primera ley, la entropía señala que un sistema abierto que interactúa con el resto está sujeta a la pérdida en la cantidad de energía. Por lo cual, si se aplica μ de trabajo, se transforma en γ cantidad de energía (siendo $\mu > \gamma$).

Esta aseveración predispone, como ya se señaló, hablar del núcleo económico como un sistema abierto sujeta a la “flecha del tiempo” en términos de energía. Las consecuencias radican en que no existe acción económica que pueda regresar a la situación previa, es decir, los fenómenos son irreversibles. Junto a la entropía, el economista rumano establece en un trabajo posterior (1979) la cuarta ley de la termodinámica. Siguiendo los mismos principios sobre sistemas abiertos, esta ley señala que además de energía los sistemas intercambian materia, razón por la cual, la materia también se somete a la pérdida de cantidad y calidad.

El sistema económico desde el universo de Georgescu-Roegen está limitado a las dos leyes de la termodinámica y ningún sistema humano puede escapar de la “muerte entrópica”. Por tanto, descartar estos elementos del esquema básico de la economía ha representado una debilidad severa en la respuesta científica frente al cambio climático y crisis ambiental. Los aportes del también matemático rumano han sido considerados como el último gran avance de la disciplina, permitiéndole abrir una agenda de investigación poco explorada y que resulta de última vanguardia en las ciencias sociales, causando la verdadera revolución copernicana en la economía¹³

Georgescu-Roegen señala en su obra que el universo está constituido por dos tipos de entropía: i) Baja entropía, se refiere a los recursos ambientales que se encuentran de manera fácil y al alcance de todo individuo. Su sencilla apropiación condujo al uso excesivo de los recursos a una tasa mayor que su regeneración. Las actividades humanas han provocado que la baja entropía disminuya, volviendo complicada su búsqueda (un ejemplo de baja entropía es el petróleo de baja profundidad o el carbón). El uso excesivo de estos recursos ha provocado que su búsqueda requiera mayor esfuerzo social y tecnología más sofisticada. La pérdida de baja entropía disminuye la cantidad de energía disponible para el resto de los sistemas. En contra

¹³Sobre estas aseveraciones véase por ejemplo Raine *et al.* (2006) y Ravasi (2019)

parte, utilizando un sinónimo acuñado por los físicos, el sistema en su conjunto incrementa su nivel de caos.

La energía gastada sigue presente en el sistema, pero perdió sus atributos convirtiéndose en residuos, emisiones, bienes económicos y contaminación. Esta nueva “apariencia” de los recursos se denomina alta entropía. En efecto, esta nueva forma de la entropía hace referencia a la energía dispersa en el sistema.

Estos elementos y la interacción del núcleo económico con el resto de sistemas constituyen los elementos base para la bioeconomía. Este enfoque desarrollado recientemente refiere al conjunto de interacciones del sistema económico con el resto de sistemas, en particular, con el sistema social y ambiental. De esta manera, el proceso económico se considera en todo momento una dinámica que transforma energía y materia para la producción de mercancías. Otro elemento clave que distingue a la bioeconomía es el reconocimiento de leyes coadyuvantes con los fenómenos económicos sin ninguna jerarquía, además de romper con la idea de linealidad y causalidad única.

Diversos autores señalan la importancia estos principios. Ravasi (2019) apunta que los aportes del profesor Roegen se traducen en los fundamentos de la bioeconomía, permitiendo superar la insuficiencia de la ciencia económica respecto a los problemas con los recursos naturales, contaminación y degradación ambiental. Al tiempo que Haak (1983) señala que la bioeconomía brinda el valor cualitativo a la energía en el proceso productivo, mientras Keswani (2020) reconoce en este enfoque permite reforzar la comprensión del fenómeno energético, integración ciencia, tecnología, economía, temas ambientales, desarrollo rural, procesos regulatorios e iniciativas sociales. Finalmente, Klitgaard (2020) establece que la bioeconomía es el enfoque apropiado para la construcción de una economía integradora de los flujos energético y los aspectos naturales que rigen la vida sobre la tierra.

De manera empírica, en la bioeconomía se han desarrollado una serie de modelos de interacción sistemáticos que permite integrar la dinámica económica a los elementos ausentes que se han señalado en los párrafos previos, principalmente los procesos internos de intercambio energético, consumo calórico, eficiencia de procesos energéticos, el papel de la entropía, desperdicio energético y reutilización con el fin de incorporar conocimiento e innovaciones para el desarrollo de una producción durable y de mínimos efectos entrópicos (Georgescu-Roegen, 1977; Passet, ; Carrillo, 2013; Hodson de Jaramillo, 2014; Rodríguez, *et al.* 2017)

Reflexiones finales

El recorrido que se realizó a través del capítulo tiene como objetivo revisar el papel de la naturaleza dentro del pensamiento económico para distinguir los posibles elementos que llevaron a la disciplina a un abandono parcial del tema y que ha conducido a una debilidad analítica estructural para afrontar los problemas medioambientales presentes. Colocar sobre la misma mesa de análisis a diversos autores permite identificar ventajas, desventajas y elementos que pueden ser recuperados para la construcción del esquema socioecológico de integración que intenta ofrecer esta tesis y que formarán parte del núcleo de la propuesta con miras a consolidar un esquema alternativo de sustentabilidad energética. Normalmente en el debate académico tiende a descartarse enfoques y enaltecer otros simplemente por una cuestión ideológica. Sin embargo, es necesario, como punto de partida, realizar una interpretación a partir de la veracidad de los hallazgos sin dejar fuera el contexto histórico que acompañó a cada corriente y economista a deducir las conjeturas que ofrecieron para la ciencia económica.

Se comienza señalando la existencia de distintas coyunturas históricas en cada enfoque. Mientras el mercantilismo y fisiocracia se desarrollaron dentro un contexto distinto al capitalismo, sus aportes permiten identificar la importancia de la naturaleza como elemento de la dinámica económica. En efecto, a pesar de ser limitada, el entorno natural está presente en la construcción teórica haciendo evidente el vínculo de la economía con relación a las condiciones naturales. Las preocupaciones sobre las emisiones y el daño ecológico de la dinámica económica quedan excluidas. Los objetivos de la humanidad eran defender la libertad humana y dotarles la capacidad a las personas de ser los responsables de sus propios actos fuera de la visión religiosa. Dentro de esta perspectiva, se rescata el papel de la naturaleza como noción de riqueza y motor de la economía.

En cuanto a los economistas clásicos, se considera la primera separación de la disciplina con los factores naturales a partir de la TVT, argumentando de manera científica que la riqueza proviene exclusivamente del trabajo humano, dejando de lado las bases materiales y naturales de la producción. Si bien existe cierta preocupación de David Ricardo y Robert Malthus acerca de los límites de la tierra en términos de productividad, se considera el trabajo humano como alternativa para salir del estado estacionario. En este periodo puede rescatarse la noción el papel del mercado como vehículo que conduce las pasiones humanas y que hasta la fecha sigue siendo el motor del sistema capitalista. Entender su dinámica permite saber los mecanismos que pueden

afectar a la naturaleza. Por otro lado, el aporte de Karl Marx respecto al metabolismo es imprescindible para entender al sistema económico como un esquema dinámico y cambiante a la luz de los factores tecnológicos y fenómenos ambientales, sobre todo, entender que cualquier modo de producción tiene un carácter inherente a destruir su fuente del valor que es la naturaleza.

Sobre el marginalismo se considera la ruptura plena de la economía con las bases materiales y con los objetivos de la economía política. Reducir los fenómenos económicos a un complejo sistema matemático obligó a la disciplina a heredar términos que actualmente dejaron de tener un potencial explicativo para los fenómenos reales y que siguen siendo la pauta obligada en los planes de estudio. El análisis fragmentando del sistema económico con relación de los fenómenos sociales y ambientales simplemente no corresponden una alternativa para el problema ecológico.

En cuanto al esquema neoclásico expresado en la economía ambiental existen puntos en contra y ciertos elementos rescatables. Por un lado, poner en la discursiva internacional el problema medioambiental. Se reconoce que el nivel de abstracción del núcleo analítico permite desarrollar una teoría ciertamente completa sobre el tema ambiental. Se pudo observar que para la gran mayoría de objetivos planteados en la agenda ecológica se cuenta con un mismo punto de partida axiomático que permite en todo momento ser consistente, además de conjugarse con la diversidad de herramientas empíricas.

Entre los elementos que se consideran relevantes es la preocupación por el actual esquema de crecimiento económico y su inviabilidad de largo plazo en términos ambientales, volviendo necesario el papel del Estado en la regulación. Sobre este último punto, la economía ambiental destaca por desarrollar escenarios para saber los sectores específicos donde la regulación debería encaminarse. Por otro lado, se premia el papel de la innovación como instrumento necesario para la transición energética y la descarbonización de la economía. Otro punto para destacar son los ejercicios empíricos que se realizan sobre la eficacia de los diversos instrumentos de política pública planteando diversos escenarios con la posibilidad de habilitar la mejor opción; conjugado con una explicación extensa sobre las fuentes de financiamiento que les permitirá a los estados nacionales implementar los planes de transformación productiva hacia la sustentabilidad. En este aspecto se considera no hay otro enfoque que de cuenta de este punto como la economía ambiental.

Los puntos en contra, en primer lugar, es la consideración del problema ambiental como un elemento determinado de manera exógena cual si no fuera causa de la producción. La idea del comportamiento racional del individuo conduce a considerar la gestión de la naturaleza debe conducirla la iniciativa privada conduciendo a una ola de privatizaciones de servicios energéticos básicos para la sociedad. Otro punto es la reducción de la naturaleza a una mercancía dejando que el mercado sea el mejor asignador cual si funcionaran najo el principio de la competencia perfecta. Respecto a la tecnología e innovación, no se explican los mecanismos por los cuales se genera de manera endógena, siendo un vacío grande pues los ODS descansan sobre la innovación como el vehículo estelar. El problema persistente en la economía ambiental es confundir causalidad con correlación, pues la mayoría de sus conjeturas descansan sobre la evidencia empírica sin preocuparse por establecer relaciones teóricas; esto deriva en que las conclusiones y recomendaciones de política sean primordialmente resultado del método econométrico o matemático utilizado. Por último, el más grande problema y del cual se ha hecho mención en múltiples ocasiones refiere a la ausencia de leyes energéticas sobre el proceso productivo derivando en la noción de un sistema cerrado cuyos fenómenos son reversibles, derivando en la ausencia de indicadores energéticos del proceso económico. Además, tiende a establecerse un dominio de las leyes económicas sobre el resto de sistemas.

En cuanto a la economía ecológica se considera como desventajas la falta de un núcleo integral y homogéneo en la propuesta de sus aportes. Varios investigadores en esta corriente consideran esta visión como una virtud, sin embargo, al analizar la clasificación de los trabajos, parece en ciertos momentos que el único punto en común es la crítica al capitalismo y a la economía ambiental. Cada corriente apunta con sus propias herramientas y categorías. Si la economía ecológica busca consolidarse como una corriente para el quehacer público tendrá que avanzar hacia esta solidificación.

Como se planteó inicialmente, esta tesis tiene como marco de desarrollo para entender las repercusiones económicas sobre el sistema social y ecológico de la transición energética. En particular, después de la revisión se consideran las últimas dos corrientes abordadas: la termodinámica y bioeconomía. Es conveniente recordar que el objetivo del trabajo es aportar un esquema socioecológico de integración que permita establecer las repercusiones de la entropía sobre el sistema económico. A su vez, analizar cómo estos impactos desencadenan de manera endógena una respuesta creativa en términos de innovación derivado de un cambio institucional

por la conciencia ambiental. Como resultado, emergen del sistema nuevas pautas de comportamiento y producción sustentables en términos energéticos.

Esta línea argumentativa encuentra en la termodinámica una primera respuesta: el papel de la entropía sobre la creación de valores en una economía. A su vez, considerar el núcleo económico como un sistema abierto en interacción con el sistema social y ambiental en constante retroalimentación de energía y materia. Las implicaciones radican en que cualquier acto productivo es irreversible.

Respecto a los aportes desde la ecología industrial resulta clave el concepto de metabolismo industrial. Se considera adecuado para comprender al sistema productivo como un proceso de producción, consumo y distribución que tiene como elemento clave la utilización, transformación y desecho energético, es decir, convertir baja en alta entropía. Dentro del esquema de flujos y materiales, será necesario incorporar los indicadores de entropía como resultado del proceso económico.

Por otro lado, la bioeconomía plantea una caracterización amplia sobre las tecnologías que, conjunto a la entropía, permitirán explicar de manera endógena la respuesta creativa del sistema económico en términos de innovación en tecnologías físicas y sociales vinculadas a la transición energética.

Como puede observarse, la recapitulación permitió la argumentación de las categorías que permitirán la construcción del esquema de integración y desarrollar las relaciones causales planteadas. Si bien en este punto falta todavía diversos elementos como explicar el mecanismo por el cual la entropía influye sobre el proceso económico, la manera en que se consolida el cambio institucional a partir de la conciencia ambiental creada en los individuos, especificar de manera amplia los determinantes de la innovación en tecnologías físicas y sociales de manera endógena para hablar de la transición como un fenómeno emergente, fue posible establecer los enfoques e implicaciones de las principales corrientes para avanzar en la construcción del modelo de integración.

El capítulo dos se enfoca a desarrollar en detalle la construcción del modelo de integración bajo las perspectivas analítica descritas considerando otro elemento clave: el comportamiento económico de los individuos a partir de la economía evolutiva. Además, constituir los diversos elementos expuestos para hablar de una integración socioecológica requerirá un esquema integrador: los sistemas complejos adaptativos.

Bibliografía

1. Aggeri, F. y Cartel, M. (2017). Le changement climatique et les entreprises : enjeux, espaces d'action, régulations internationales. 1 (86) :6-20
2. Alves, F., Leal Filho, W., Casaleiro, P., Nagy, G., Diaz, H., Al-Amin, A. y Azeiteiro, U. (2020). Climate change policies and agendas: Facing implementation challenges and guiding responses. *Environmental Science and Policy*, 104, 190-198.
3. Ansari, M., Haider, S. y Khan, N. (2020). Environmental Kuznets curve revisited: An analysis using ecological and material footprint. *Ecological Indicators*, 115: 106416.
4. Arrow, K. y Debreu, G. (1954). Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 265-290
5. Ayres R. (1989) «Le métabolisme industriel et les changements de l'environnement »
6. Baarsch, F., Granadillos, J., Hare, W., Knaus, M., Krapp, M., Schaeffer, M., y Lotze-Campen, H. (2020). The impact of climate change on incomes and convergence in Africa. *World Development*, 126:104699.
7. Babatunde, K., Begum, R. y Said, F. (2017). Application of computable general equilibrium (CGE) to climate change mitigation policy: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 :61-71.
8. Balzani, V. (Ed.) (2019). *An Energy Transition To Save The Planet*. Firenze University Press.
9. Bidard, Christian, Klimovsky, Edith, y Benetti, Carlo (2006). *Capital, salaires et crises : une approche classique*. Francia : Éditions Dunod.
10. Bilgili, F., Koçak, E., y Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO2 emissions: a revisited Environmental Kuznets Curve approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1(54): 838-845.
11. Böhringer, C., y Löschel, A. (2006). Computable general equilibrium models for sustainability impact assessment: Status quo and prospects. *Ecological economics*, 60(1):49-64.
12. Boutillier, S. (2003). Les économistes et l'écologie, enseignements historiques. *Innovations*, (2) : 139-165.
13. Boutillier, S. (2016). L'écologie dans la pensée économique. Colloque international francophone, Le développement durable : débats et controverses. Disponible en <http://www.oeconomia.net/private/colloquediufm/08.colloquedd-boutillier.pdf>
14. Bruel, A., Kronenberg, J., Troussier, N., y Guillaume, B. (2019). Linking industrial ecology and ecological economics: A theoretical and empirical foundation for the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 12-21
15. Büchs, M. y Kochb, M. (2019). Challenges for the degrowth transition: The debate about wellbeing. *Futures* 105: 155–165
16. Bunge, M. (1975). *Teoría y realidad*. Editorial Ariel
17. Burkett, P. (2003). The value problem in ecological economics. Lessons from the physiocrats and Marx. *Organización and Environmental*, 16(2):137-167
18. Callicott, J. (1984). Non-Anthropocentric Value Theory and Environmental Ethics. *American Philosophical Quarterly*, 21, pp. 299-309.

19. Calvo, G. y Valero, A. (2017). Thermodynamic Approach to Evaluate the Criticality of Raw Materials and Its Application through a Material Flow Analysis in Europe. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 839-852.
20. Calvo, G., Valero, A., y Valero, A. (2018). Thermodynamic approach to evaluate the criticality of raw materials and its application through a material flow analysis in Europe. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 839-852.
21. Cárdenas, E. (1987). *La industrialización mexicana durante la Gran Depresión*. Fondo de Cultura Económica-El Colegio de México.
22. Chai, Q., Fu, S. y Qi, Y. (2020). Evaluation on the Paris Agreement work program and prospects for global climate governance. *Climate Change Research*, 16(2): 232-242
23. Churchill, S. A., Inekwe, J., Ivanovski, K. y Smyth, R. (2018). The environmental Kuznets curve in the OECD: 1870–2014. *Energy Economics*, 75: 389-399.
24. Cosme, I., Rui, S., O’Neill, D. (2017) Assessing the degrowth discourse: A review and analysis of academic degrowth policy proposals. *Journal of Cleaner Production*, 149:321-334
25. Criqui, P. (2009). Vers une rupture profonde du modèle énergétique mondial. *Questions internationales, La Documentation française*, 1 : 67-78.
26. Crutzen, P., y Stoermer, E. F. (2000). *The anthropocene*. Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm. 41.
27. Destek, M. , Ulucak, R., y Dogan, E. (2018). Analyzing the environmental Kuznets curve for the EU countries: the role of ecological footprint. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(29), 29387-29396.
28. Destek, M. y Sarkodie, S. A. (2019). Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: the role of energy and financial development. *Science of the Total Environment*, 650: 2483-2489.
29. Deswanto, R. y Siregar, S. (2018). The associations between environmental disclosures with financial performance, environmental performance, and firm value. *Social Responsibility Journal*, 14 (1):80-193.
30. Dimitrov, R., Hovi, J., Sprinz, D., Sælen, H. y Underdal A. (2019). Institutional and environmental effectiveness: Will the Paris Agreement work? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(4): 583.
31. Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological economics*,
32. Dogan, E., e Inglesi-Lotz, R. (2020). The impact of economic structure to the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis: evidence from European countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11): 12717-12724.
33. Eastin, J. (2018). Climate change and gender equality in developing states. *Journal World development*, 17: 289–305ecological economics. *Ecological Economics* 169:106518
34. Elmagrhi, M., Ntim, C., Elamer, A. y Zhang, Q. (2019). A study of environmental policies and regulations, governance structures, and environmental performance: The role of female directors. *Business Strategy and the Environment*, 28(1), 206-220.

35. Elshamy, H. Khaled I. Ahmed, S. (2017). Green Fiscal Reforms, Environment and Sustainable Development. *International Journal of Applied Economics, Finance and Accounting*, 1(1):48-52.
36. Elshamy, H. y Ahmed, K. (2017). Green fiscal reforms, environment and sustainable development. *International Journal of Applied Economics, Finance and Accounting*, 1(1), 48-52.
37. Erkman S. (1998) *Vers une écologie industrielle*. La Librairie-Paris
38. Erkman, S. (1995). *Ecologie Industrielle, Metabolisme Industriel, et Société' D'utilisation*, Foundation for the Progress of Humanity, Paris.
39. Fawzy, S., Osman, A., Doran, J. y Rooney, D. (2020) Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18:2069–2094
40. Foster, J., Clark, B., y York, R. (2011). *The ecological rift: Capitalism's war on the earth*. New York University Press.
41. Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., y Takahashi, K. (2014). Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions. *Food Security*, 6(5):685-699.
42. Fuzzi, S. (2019). Energy in a changing climate. *Substantia*, 3(2),17-26.
43. Galli, A., Kitzes, J., Niccolucci, V., Wackernagel, M., Wada, Y., y Marchettini, N. (2012). Assessing the global environmental consequences of economic growth through the ecological footprint: a focus on China and India. *Ecological Indicators*, 17, 99-107.
44. García-Guaita, F., González-García, S., Villanueva-Rey, P., Moreira, M. y Feijoo, G. (2018). Integrating urban metabolism, material flow analysis and life cycle assessment in the environmental evaluation of Santiago de Compostela. *Sustainable cities and society*, 40:569-580.
45. Gelan, A. (2018). Economic and environmental impacts of electricity subsidy reform in Kuwait: a general equilibrium analysis. *Energy Policy*, 112, 381-398.
46. Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press.
47. Georgescu-Roegen, N. (1975). Energía y mitos económicos, en *El trimestre económico*, 42:779-836.
48. Georgescu-Roegen, N. (1979). *La décroissance : entropie, écologie, économie*. Éditions Sang de la Terre.
49. Georgescu-Roegen, N. (1986). The entropy law and the economic process in retrospect. *Eastern Economic Journal*, 12, pp. 3-25.
50. Georgescu-Roegen, N. (1993). The entropy law and the economic problem, en *Valuing the Earth: Economics, ecology, ethics*, pp. 75-88.
51. Giacomo D'Alisaa, G., y Kallis, G. (2020). Degrowth and the State. *Ecological Economics*: 169:106486
52. Graedel, T. (1999). On the concept of industrial ecology. *Review Energy Environmental*, 21:69–98
53. Graedel, T. y Allenby B. (2010) *Industrial ecology and sustainable engineering*. Prentice Hall

54. Grinevald, J. (2009). La révolution industrielle à l'échelle de l'histoire humaine de la biosphère. *Revue européenne des sciences sociales*. 34-134. Disponible en <http://journals.openedition.org/ress/293>.
55. Grossman, G., Krueger, A. (1995). "Economic Growth and the Environment", *Quarterly Journal of Economics*, 2: 353-377.
56. Guha, R. (1994) El ecologismo de los pobres. *Ecología Política* (8):137–151.
57. Halicioglu, F. (2009). An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. *Energy policy*, 37(3) :1156-1164.
58. Harris, J. (2019). Ecological Economics of the Green New Deal. *Climate Policy Brief* (11).
59. Haunschild, R., Bornmann, L. y Werner Marx, W. (2016) Climate Change Research in View of Bibliometrics. *PLOS One*, 11(7):0160393.
60. He, W., Tan, L., Liu, Z. y Zhang, H. (2020). Property rights protection, environmental regulation and corporate financial performance: Revisiting the Porter Hypothesis. *Journal of Cleaner Production*, 264: 121615.
61. Hovi, J., Skodvin, T. y Andresen, S. (2003). The Persistence of the Kyoto Protocol: Why Other Annex I Countries Move on Without the United States. *Global Environmental Politics* 3(4,).
62. Huberman, Leo (1936). *Man's Wordly goods*, New York: New York University Press.
63. Infante-Amate, J., de Molina, M. y Toledo, V. (2017). El metabolismo social. Historia, métodos y principales aportaciones. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 27: 130-152
64. Iraldo, F., Testa, F., Melis, M., y Frey, M. (2011). A literature review on the links between environmental regulation and competitiveness. *Environmental Policy and Governance*, 21(3):210-222.
65. Islam, M. y Huda, N. (2019). Material flow analysis (MFA) as a strategic tool in E-waste management: Applications, trends and future directions. *Journal of environmental management*, 244 : 344-361.
66. Islam, N. y Winkel, J. (2017). *Climate Change and Social Inequality*. Department of Economic and Social Affairs.
67. Jaffe, A. y Palmer, K. (1997). Environmental regulation and innovation: a panel data study. *Review of economics and statistics*, 79(4), 610-619.
68. Keen, S. (2020) The appallingly bad neoclassical economics of climate change, *Globalizations*:1-29.
69. Kim Y, Tanaka K y Matsuoka, K. (2020) Environmental and economic effectiveness of the Kyoto Protocol. *PLOS ONE* 15(7): 236299.
70. King, A. y Harrington, L. (2018). The inequality of climate change from 1.5 to 2°C of global warming. *Geophysical Research Letters*, 45:030–5033.
71. Kraft, J., y Kraft, A. (1978). On the relationship between energy and GNP. *The Journal of Energy and Development*,3(2):401-403.
72. Lelieveld, J., Klingmüller, K., Burnett, T., Haines y Ramanathan, V. (2019) Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *PNAS* 116 (15): 7192-7197.

73. Lenton, T. y Held, H. (2008). Supplement to tipping elements in the earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6): 1786-1793.
74. Lenzen, M., Li, M., Malik, A., Pomponi, F., Sun, Y. y Wiedmann, T. (2020). Global socioeconomic losses and environmental gains from the Coronavirus pandemic. *PLOS ONE* 15(7): 235654.
75. Leopold, A. (1939). *The Land Ethic*, *A Sand County Almanac*. 1: 201-226.
76. Li, G., y Masui, T. (2019). Assessing the impacts of China's environmental tax using a dynamic computable general equilibrium model. *Journal of Cleaner Production*, 208: 316-324.
77. Liao, Z. (2018). Environmental policy instruments, environmental innovation and the reputation of enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 171:1111-1117.
78. Lindsey, R. y Dahlman, L. (2019). *Climate Change: Global Temperature*. National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2019. Disponible en <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913>.
79. Lindsey, R., y Dahlman, L. (2019). *Climate Change: Global Temperature*. NOAA.
80. Magnusson, L. (1994). *Mercantilism: the shaping of an economic*. Routledge London and New York.
81. Marcos, J. (2017). Más allá del Desarrollo: decrecimiento. *Revista Internacional de Pensamiento Político*, 12:467-482.
82. Marshall, A. (1890). *Principles of Economics*. Macmillan for the Royal Economic Society.
83. Martínez-Alier, J (1994) *De la Economía Ecológica al ecologismo popular*, 2nd ed. Icaria,
84. Matagne, P. (2003). Aux origines de l'écologie. *Innovations*, (2), 27-42.
85. Meadows, D., Randers, J., y Behrens, W. (1972). The limits to growth. En K. Conca y G. Dabelko (Eds.). (2019). *Green planet blues: Critical perspectives on global environmental politics*. New York: Routledge.
86. Mikayilov, J., Hasanov, F. y Galeotti, M. (2018). Decoupling of CO2 emissions and GDP: A time-varying cointegration approach. *Ecological indicators*, 95(1): 615-628
87. Mokyr, J. (1985). The industrial revolution and the new economic history. In *The economics of the industrial revolution* (pp. 1-51). Rowman y Littlefield.
88. Mokyr, J. (2010). *The Enlightened economy an economic history of Britain 1700-1850*. Yale University Press.
89. Molina, M. y Rowland, F. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249 (5460):810-812.
90. Montesquieu, Charles (1748). *The Spirit of the Laws*. Cambridge: Cambridge University Press.
91. Munir, Q., Lean, H., y Smyth, R. (2020). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in the ASEAN-5 countries: A cross-sectional dependence approach. *Energy Economics*, 85(1), 104571.
92. Nieto, J., Carpintero, O. y Miguel, L. (2018). Less than 2 °C? An Economic-Environmental Evaluation of the Paris Agreement. *Ecological Economics*, 146, 69-84.
93. Nordhaus, W. (1973). World dynamics: Measurement without data. *Economic Journal*, 83(332): 1156-1183.

94. Nordhaus, W. (1993). Reflections on the economics of climate change. *Journal of Economic Perspectives*, 7(4), 11-25.
95. Nordhaus, W. (2018b). Projections and uncertainties about climate change
96. Omri, A. (2013). CO2 emissions, energy consumption and economic growth nexus in MENA countries: Evidence from simultaneous equations models. *Energy economics*, 40 :657-664.
97. Owen, A. y Hanley, N. (Eds.) (2004). *The economics of climatic change*. Routledge London and New York.
98. Özokcu, S. y Özdemir, Ö. (2017). Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72: 639-647.
99. Petit, O. (2018). L'émergence d'une socioéconomie écologique. *Lecture croisée de trois ouvrages récents. Natures Sciences Sociétés* 26(4):463-472.
100. Pigou, A. (1912). *Wealth and welfare*. Macmillan and Company, limited.
101. Pincus, S. (2012). Rethinking Mercantilism: Political Economy, The British Empire and the Atlantic World in the 17th and 18th Centuries. *The William and Mary Quarterly*, 69(1), 3-34.
102. Porter, M. (1991). Towards a dynamic theory of strategy. *Strategic management journal*, 12(2), 95-117.
103. Porter, M. y Van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of economic perspectives*, 9(4):97-118.
104. Quesnay, François (1969). *Tableau économique des physiocrates*. Francia: Calmann-Lévy.
105. Radanne, P. (2006). *Changement climatique et société(s)*. *Ecologie et politique*, 2(33) :95-115
106. Ramanathan, R., He, Q., Black, A., Ghobadian, A. y Gallear, D. (2017). Environmental regulations, innovation and firm performance: A revisit of the Porter hypothesis. *Journal of Cleaner Production*, 155: 79-92.
107. Rankin, K. (2011). *Mercantilist Reasoning in Economic Policy Making*. Conference of the New Zealand Association of Economists Wellington. Disponible en https://www.nzae.org.nz/wp-content/uploads/2011/Session5/57_Rankin.pdf
108. Reina, J. (2013). *Metabolismo Social: Hacia la sustentabilidad de las transiciones socio ecológicas urbanas*. Facultad de Ciencias Económicas.
109. Requate, T. (2005). Dynamic incentives by environmental policy instruments—a survey. *Ecological economics*, 54(2-3):175-195.
110. Ricardo, David (1817). *Principles of political economy and taxation*. London: Macmillan
111. Rizal, N., and Yatminiwati, M. (2019). Green accounting disclosures in efforts to improve environmental performance and financial performance. *Proceedings Progress Conference*, 2(2):91-95.
112. Robbins, Lionel (1944). *Naturaleza y significación de la ciencia económica*. México: Fondo de Cultura Económica.
113. Rollison, D. (2010). *A commonwealth of the people: popular politics and England's long social revolution, 1066-1649*. Cambridge University Press.

114. Rolston III, H. (1982). Are values in Nature Subjective or Objective? *Environmental Ethics*, 4: 125-15.
115. Rostow, W. (1960). *The stages of economic growth: A non-communist manifesto*. Cambridge University Press.
116. Russell, S., Milne, M. y Dey, C. (2017). Accounts of nature and the nature of accounts: Critical reflections on environmental accounting and propositions for ecologically informed accounting. *Accounting, Auditing and Accountability Journal*, 30(7):426-1458
117. Saidi, K., y Hammami, S. (2015). The impact of CO2 emissions and economic growth on energy consumption in 58 countries. *Energy Reports*, 1:62-70.
118. Sangwon, Suh (2005). Theory of materials and energy flow analysis in ecology and economics. *Ecological Modelling* 189(3–4):251-269.
119. Say, Jean (1803). *A treatise on political economy*. London: Grigg.
120. Schlegelmilch, K., Cottrell, J., Runkel, M., y Mahler, A. (2016). Environmental tax reform in developing, emerging and transition economies. Research Report. Disponible en <https://www.econstor.eu/handle/10419/199218>
121. Schmidt, A. (2013). *The concept of nature in Marx*. Verso London.
122. Shabbir, M. y Wisdom, O. (2020). The relationship between corporate social responsibility, environmental investments and financial performance: evidence from manufacturing companies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27:1-12.
123. Shackle, G. (1990). *La naturaleza del pensamiento económico*. Fondo de Cultura Económica.
124. Shahbaz, M., y Sinha, A. (2019). Environmental Kuznets curve for CO2 emissions: a literature survey. *Journal of Economic Studies*, 46(1):106-168.
125. Sharifi, A., Simangan, D. y Kaneko, K. (2000). Three decades of research on climate change and peace: a bibliometrics analysis. *Sustainability Science*
126. Shi, Y., y Gullett, W. (2018). International regulation on low-carbon shipping for climate change mitigation: Development, challenges, and prospects. *Ocean Development and International Law*, 49(2), 134-156.
127. Shipalana, P. (2020). *Green Finance Mechanisms in Developing Countries: Emerging Practice*.
128. Sinn, H. (2012). *The green paradox: a supply-side approach to global warming*. MIT press.
129. Smith, A. (1776). *The Wealth of Nations: An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. United Kingdom: Harriman House Limited.
130. Solovida, G. y Latan, H. (2017). Linking environmental strategy to environmental performance: Mediation role of environmental management accounting. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 8 (5):595-619.
131. Somjai, S., Fongtanakit, R., y Laosillapacharoen, K. (2020). Impact of environmental commitment, environmental management accounting and green innovation on firm performance: An empirical investigation. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(3), 204.
132. Spash, C. (2012). New foundations for ecological economics. *Ecological Economics*, 77,36–47

133. Spash, C. (2020). A tale of three paradigms: Realising the revolutionary potential of
134. Stavins, R., Zou, J., Brewer, T., Conte Grand, M., Den Elzen, M., Finus, M. y Winkler, H. (2014). International cooperation: agreements and instruments. *Climate change*, 7(5): 1001-1082.
135. Stephenson, J., Barton, B., Carrington, G., Gnoth, D., Lawson, R., y Thorsnes, P. (2010). "Energy cultures: A framework for understanding energy behaviours". *Energy policy*, 38(10):120-129.
136. Sweet, T. (1999). Economy, Ecology, and Utopia in Early Colonial Promotional Literature. *American Literature*, 71(3):399-427.
137. Takeda, S., y Arimura, T. (2021). A computable general equilibrium analysis of environmental tax reform in Japan with a forward-looking dynamic model. *Sustainability Science*, 1-19.
138. Tang, L., Shi, J., Yu, L., y Bao, Q. (2017). Economic and environmental influences of coal resource tax in China: A dynamic computable general equilibrium approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 117 :34-44.
139. Tannenbaum, F. (1951). México: la lucha por la paz y por el pan. *Problemas agrícolas e industriales de México*, 3(4):11-155.
140. Toledo, V. (2013). El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, 34(136): 41-71.
141. Tucker, J. (2020). *Epochs of Ecology: The Transition from Feudalism to Capitalism*. Faculty of the College of Arts, Humanities and Social Sciences. University of Denver
142. Turgot, A. (1766). *Réflexions sur la formation et la distribution des richesses*. McMaster University Archive for the History of Economic Thought. Disponible en <https://socialsciences.mcmaster.ca/econ/ugcm/3I13/turgot/reflfr.htmSmith>
143. Vivien, F. (2000). *Economía y ecología*. Editorial Abya Yala.
144. Vivien, F. (2004). *Un panorama des propositions économiques en matière de soutenabilité*. *Vertigo : Revue*
145. Vivien, F. (2005). *Le développement soutenable : un sujet controversé chez les économistes*. Laboratoire Organisations marchandes et institutions. Université de Reims Champagne Ardenne
146. Vivien, F. (2006). *Le développement Soutenable*. *Revue Économie rurale Agricultures, alimentations, territoires*, 291:79-90.
147. Vivien, F. y Aubertin, C. (2006). *Le développement durable enjeux politiques, économiques et sociaux*. La documentation Française, Paris.
148. Vivien, F., Dannequin, F., Diemer, A. (1999). *Industrielle ou politique ? Quelle écologie pour le développement durable ?* International Conference on Industrial Ecology and Sustainability. Université technologique de Troyes. Disponible en <http://oeconomia.net/private/recherche/ecologieindustrielle Troyes 1999.pdf>.
149. Vivien, F., Dannequin, F., Diemer, A., y Petit, R. (2000). *La nature comme modèle ? Écologie industrielle et développement durable*. *Nature, Culture et Economie*, (38) : 63-75.
150. Wang, Y., Sun, X., y Guo, X. (2019). Environmental regulation and green productivity growth: Empirical evidence on the Porter Hypothesis from OECD industrial sectors. *Energy Policy*, 132: 611-619.

151. Warde, P., Robin L. y Sörlin, S. (2018). The environment. A history of the idea. John Hopkins University Press
152. Ware, N. (1931). The Physiocrats: a study in economic rationalization. The American Economic Review, 607-619.
153. Warren, G. (1973). Natural selection in economic Thought: ideology, power and the Keynesian counterrevolution, Journal of Economic Issues 1(7):1-27.
154. Weiss, M. y Cattaneo, C. (2017). Degrowth – Taking Stock and Reviewing an Emerging Academic Paradigm. Ecological Economics, 137:220–230.
155. World Meteorological Organization (2020). The Global Climate in 2015–2019. Disponible en: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/global-climate-2015-2019-climate-change-accelerates>

**CAPÍTULO 2. HACIA UNA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DE LA ECONOMÍA,
ECOLOGÍA, SOCIEDAD Y ENTROPÍA: EL MODELO MULTINIVEL
BIOEVOLUTIVO PARA EL ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA**

Introducción

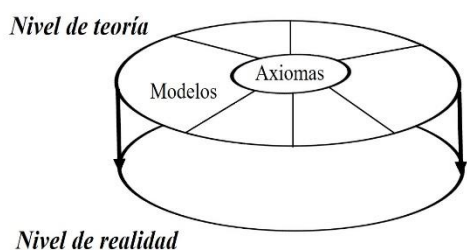
La complejidad de los problemas ambientales exige abordarse desde múltiples perspectivas analíticas. El objetivo del capítulo es presentar una construcción teórica propia sobre el proceso de transición socioambiental denominado *Modelo Multinivel Bioevolutivo* (MMB). La propuesta pretende ser un aporte al debate, desde la economía, para la comprensión de los factores que inciden sobre la transición energética.

De acuerdo con Geels (2022), la perspectiva multinivel permite desglosar el análisis en tres dimensiones: micro, meso y macro. Sin embargo, en la actualidad, la mayoría de los modelos para el análisis de la transición carecen de microfundamentos que expliquen el comportamiento de los individuos frente a cambios en el sistema. Por lo cual, el MMB propone un marco teórico microfundamentado para comprender la respuesta de los individuos y estructura productiva frente a las consecuencias del cambio climático asociado a los crecientes niveles de entropía.

El análisis socioeconómico y ambiental ha revolucionado la forma de abordar conceptualmente las disciplinas sociales y ciencias exactas, incrementando la colaboración multidisciplinaria y modificando los métodos de análisis. Por lo cual, la propuesta del MMB se construye a partir de elementos que provienen de tres corrientes analíticas: bioeconomía, economía evolutiva y sistemas complejos adaptativos.

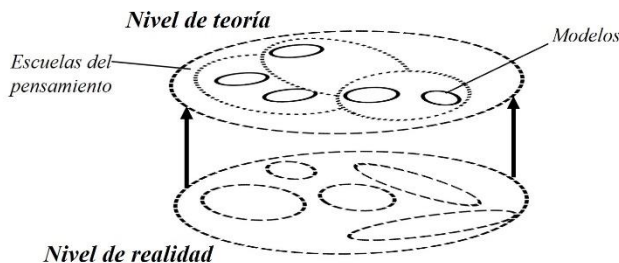
La figura 2 representa la naturaleza de la construcción del MMB. Se trata de postular supuestos que capturen en mayor grado la dinámica real en lugar de priorizar la capacidad predictiva a costa de sacrificar el realismo de los supuestos, tal como ha priorizado la economía neoclásica, cuyo método se ilustra en la figura 1.

Figura 2. 1. Epistemología economía tradicional



Fuente: Chick y Dow (2005)

Figura 2.2 Epistemología economía heterodoxa



Fuente: Chick y Dow (2005)

Este capítulo integra la dinámica de interacciones en tres niveles: escala meso, micro y macro, reconociendo así la dinámica de sistemas abiertos. Cada una de ellas se caracteriza por elementos específicos de las interrelaciones técnicas y socioambientales. El resultado del MMB es explicar el proceso de transición socioambiental como un fenómeno endógeno y emergente al sistema, cuya finalidad es la difusión de métodos productivos cuyo desempeño entrópico sea el mejor a través de la elección de energías más limpias.

El capítulo se desarrolla de la siguiente manera. El primer apartado se analiza el papel de la bioeconomía como base para comprender los impactos de la entropía sobre el proceso económico. La entropía, entendida como manifestación del cambio climático, incide sobre la escala macro y meso. Asimismo, se considera el problema del cambio climático como manifestación del creciente nivel entrópico traducido cuantitativamente en residuos y cualitativamente en generación de emisiones de efecto invernadero.

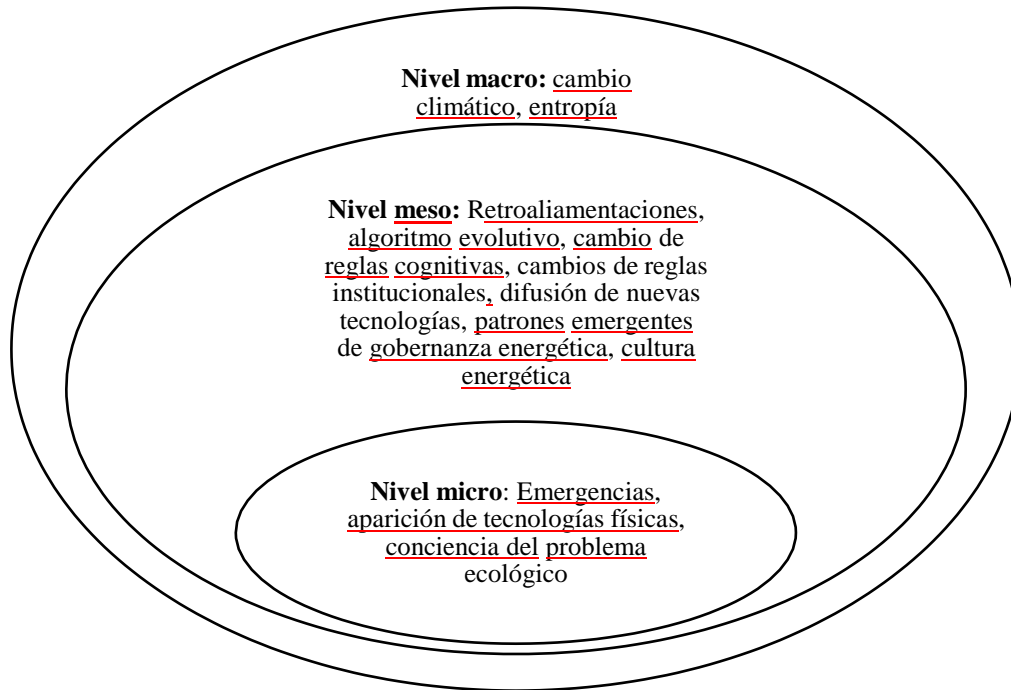
Para internalizar ambos fenómenos, es necesario construir los mecanismos a través de los cuales inciden sobre la dinámica meso y micro. En el apartado segundo se bosqueja, desde la economía evolutiva, el impacto de la entropía en el conjunto de reglas e instituciones, sobre la cultura energética y estructura productiva. Debido a que el Homo *Œconomicus* es insuficiente para interiorizar los cambios en las diferentes escalas, se recurre al Homo Sapiens *Œconomicus* constituido por reglas cognitivas y a su vez se rige por reglas institucionalizadas por la sociedad.

Se busca identificar los efectos a escala micro y meso que genera la incidencia de la entropía y el cambio climático. La misión objetiva de las empresas es el desarrollo de prácticas que reduzcan el nivel general entrópico con el fin de mitigar los efectos adversos al deterioro energético. Debido a que la estructura organizativa y reglas de las empresas es diferente, tendrán dos tipos de respuesta: adaptativa y creativa. La primera hace referencia a las empresas que no realizan ninguna acción para reducir su impacto ambiental y sólo se interesa por minimizar los costos de producción. La respuesta adaptativa fortalece las capacidades tecnológicas y rutinas productivas.

En la escala micro, se plantean los mecanismos y determinantes que inducen la aparición de emergencias, concebidas como procesos de innovación endógenas en tecnologías físicas y sociales en busca de cumplir con la función objetiva del sistema. A este nivel se construye un algoritmo de selección evolutiva que selecciona aquellas técnicas productivas que garanticen un nivel de sustentabilidad fuerte. De tal forma, el sistema busca su orden a partir de la selección

difusión y replicación tecnologías energéticas sustentables. La figura 2.3 muestra los fenómenos analizados en cada escala.

Figura 2.3. Escalas de análisis



Fuente: Elaboración propia

2.1 El mundo de Georgescu-Roegen: entropía y procesos económicos

2.1.1 ¿A qué nos referimos con termodinámica y entropía?

El desarrollo de la civilización humana ha tenido como rasgo característico el dominio de las formas de energía y materias existentes. Desde los primeros grupos de humanos que lograron controlar el fuego hasta los actuales científicos que intentan identificar las propiedades de la materia oscura. Cualquier sistema humano antes de supeditarse a las leyes internas que genera la dinámica de los actores sociales se desenvuelve en una compleja red de interacciones con el sistema ambiental. Al coadyuvar ambas dinámicas es inherente la influencia de las leyes naturales. En particular, las leyes de la termodinámica son las que reciben mayor atención pues se encargan de los problemas relacionados con la conversión de energía (García-Colin, 1976). Por ende, cualquier acción humana como transportarse, cocinar, fabricar muebles o simplemente alimentarse conlleva utilización y transformación de energía, implica termodinámica.

En primera instancia, es pertinente señalar que durante el trabajo se hará referencia a la termodinámica haciendo uso sólo de las matemáticas indispensables para su representación. Tal como señala Glucina y Mayumi (2010), el formalismo matemático es de mayor importancia para los físicos, ingenieros o matemáticos y no es indispensable para los científicos sociales.

Las leyes de la termodinámica explican las propiedades en el proceso de transferencia de energía que existe entre un sistema y su entorno. Es la ciencia de la conservación de la cantidad y el cambio en la calidad de la energía en un sistema con el fin de comprender el calor y el trabajo (Schneider y Kay, 1994). Este conjunto de reglas es aplicable a todo sistema que tiene entrada, procesamiento y salida de materiales y energía (García-Colin, 1976), siendo el proceso económico un espacio adecuado para incorporarlo en sus dimensiones físicas.

La primera ley de termodinámica enunciada por Rudolf Celsius (1854) señala que para todo proceso la variación de energía interna del sistema debe ser igual a las cantidades de calor y trabajo que intercambia con sus alrededores. La ecuación 2.1 muestra el formalismo:

$$\Delta U = W + Q \quad (2.1)$$

Donde ΔU es el cambio de energía interna del sistema, W la cantidad de trabajo y Q la cantidad de calor. Es decir, todo proceso que intenta crear o destruir energía es imposible debido a que la transformación de trabajo en calor sucede sin ningún límite. Sin embargo, a partir de los trabajos de Kelvin-Planck y Rudolf Clausius identificaron que no es posible en todos los casos extraer calor y convertirlo en trabajo. Fue así como el físico alemán presentó **la segunda ley de termodinámica**. De manera sintética puede enunciarse como la imposibilidad de transferir una cierta cantidad de calor de un cuerpo frío hacia un cuerpo caliente (o dos cuerpos con temperaturas distintas) sin que exista un cambio cualitativo. La variable termodinámica captura el calor que no puede convertirse en trabajo es la entropía. La ecuación 2.2 formaliza lo anterior, donde ΔS son los cambios de entropía, mientras Q es la cantidad de calor que pasa de un cuerpo a temperatura T_1 a otro cuerpo con temperatura T_2 .

$$\Delta S = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) Q \quad (2.2)$$

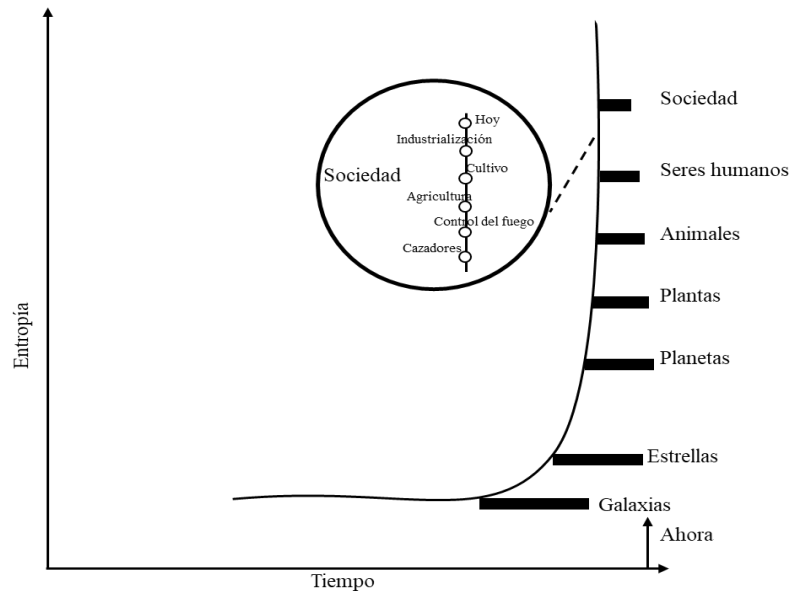
La entropía es una propiedad inherente a la existencia de la materia y las partículas elementales del universo. Sin embargo, la característica de cada sistema, de acuerdo con la segunda ley de termodinámica, determina si el nivel de entropía es constante o creciente. En el caso de sistemas sociales y naturales son ejemplos de *sistemas no aislados* (hay interrelaciones al interior y exterior con otros sistemas), mientras que el Universo es el mejor ejemplo de un *sistema aislado* (es decir, que no existe ningún sistema fuera de él).

Esta distinción permite precisar que en el Universo genera un nivel de entropía constante pero el resto de los sistemas a su interior producen niveles de entropía creciente. La suma de ambas permite calcular la variación de entropía del Universo (Ben-Naim, 2012), que puede representarse en la ecuación 2.3.

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{sistemas} + \Delta S_{entorno} \quad (2.3)$$

Razón por la cual, sin importar el nivel de deterioro que puedan causar las prácticas humanas, el nivel entrópico de los sistemas y su entorno jamás rebasaría el nivel máximo. De allí, tal como enuncia Clausius (1854), el nivel de entropía tiende a un máximo.

Figura 2.4 Evolución de la entropía



Fuente: Adaptada de Chaisson (2005)

La figura 2.4 muestra los motores de generación entrópica en el Universo. De manera general puede observarse que el surgimiento del Universo, las constelaciones y las galaxias generaron cierto nivel de entropía constante, mientras que la aparición de los primeros humanos y la conformación de las sociedades incrementaron marginalmente los niveles entrópicos. La dinámica social no modificará la dirección que inevitablemente llevará en miles de años a la muerte entrópica del Universo.

Desde una posición pesimista, parece poco relevante el estudio de la termodinámica y la entropía de los sistemas sociales y en particular el sistema económico. No obstante, la relevancia no recae en conocer por sí mismo el nivel específico de entropía en términos numéricos sino su manifestación sobre los aspectos cualitativos de cada sistema -ambiental, social y económico- y la manera en que modifica las interrelaciones sistemas-entorno.

Gran parte de la evolución de las sociedades fueron más allá del núcleo energético disponible provocando el incremento de entropía, es decir, la energía no disponible y carente de sus propiedades originales para generar tareas específicas. De aquí se deriva la importancia de considerar la entropía como un indicador del uso de los recursos naturales en el proceso

económico y su transformación en energía, residuos y emisiones.

Particularmente, el desarrollo de las sociedades humanas y su relación con el núcleo energético ha sido una de las principales causas del deterioro ambiental contribuyendo de manera acelerada a la dinámica del cambio climático. En efecto, a medida que se cuenta con evidencia de largo plazo sobre la dinámica del cambio climático, se confirma el papel del ser humano como principal motor del daño ecológico. Así es como Crutzen (2002) denomina la época actual bajo el término de Antropoceno, refiriéndose al daño ocasionado sobre el ambiente a causa de las actividades humanas. Esta definición dio pauta al desarrollo de conceptos, por ejemplo, el Capitaloceno propuesto por Moore (2016), que van más allá de una responsabilidad global del ser humano respecto sobre el daño ecológico y enfatiza en la importancia de las relaciones sociales dentro del capitalismo que conduce un consumo energético desigual entre las clases sociales, los países de baja, media y alta industrialización.

Desde estas perspectivas se ejemplifica el vínculo inherente entre el proceso económico y el daño ecológico. Como se ha señalado en el capítulo 1, la generación de mercancías en una sociedad está inherentemente vinculado a la transformación de energía en entropía. A medida que se acelere el proceso de producción mayor será el incremento de la entropía y los efectos adversos del cambio climático se manifiestan de forma intensa. Introducir al análisis el proceso de entropía será una manera de integrar una variable que advierte del daño ecológico vinculado al cambio climático.

2.1.1.1 Entropía y sus distintas conceptualizaciones

Antes de profundizar en la relación entre entropía y economía, es necesario plantear las diferentes posturas acerca de su definición. El término de entropía ha sido sujeto de controversia en su definición y de múltiples interpretaciones debido a su falta de claridad conceptual. Como señala Kovaley (2016) las maneras de conceptualizarlas es un reflejo del desconocimiento que tiene la comunidad científica.

En la revisión de la literatura que se realiza en esta tesis puede encontrarse al menos tres grandes posturas con relación a la entropía. En la tabla 2.1 se enlistan las principales definiciones, la formula, las diferencias entre ellas y sobre todo las críticas que se han

realizado desde los teóricos de la física hacia el uso que se les ha dado en el campo de la economía.

Cuadro 2.1. Conceptualización de la entropía y su relación con la economía

Concepto	Autores pioneros	Formula y enunciado	Interpretación en la economía y algunas aplicaciones	Crítica/aporte desde la física al uso dado por los economistas
Entropía termodinámica	Rudolf Celsius (1864)	$\Delta S = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) Q$ <p>Imposibilidad transformar todo el calor en trabajo. Entropía del Universo tiende al máximo</p>	Utilizado como medida de escasez y pérdida de energía.	Tiende a utilizarse frecuentemente entre los economistas como una variable representativa de la escasez. Sin embargo, en términos termodinámicos no tiene ninguna relación
Entropía de mecánica estadística	Ludwig Boltzmann (1875)	$S = -k_B N \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$ <p>Considera macroestados (conjunto de partículas) compuesto de microestados compatibles con el estado macroscópico determinado. Se enuncia: "En un sistema aislado las variaciones de la entropía provienen de la distribución espacial y energética de las moléculas. Incrementos de entropía corresponde a la mayor probabilidad de microestados compatibles con el microestado, es decir, al más desordenado".</p>	Se asemeja como indicador que mide el grado de orden y desorden.	Esta definición de entropía se deslinda de los balances energéticos. Su principal aplicación es en el área de la química en el análisis de partículas. Desde la física un sistema es ordenado si cumple con su función objetivo.
Entropía de la información	Claude Shannon (1948)	$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$ <p>Aplicación en teoría de la información Mide la incertidumbre en que cierto mensaje (información del sistema) sea escogido entre alternativas posibles. H expresa una medida de falta de información. Se enuncia Imposibilidad de</p>	Asociado como medida de diversidad de elementos y autoorganización	Debido a que la función de probabilidad, la constante K de Boltzmann, es equivalente a la medición de entropía de información, suele asociarse ambas mediciones como equivalentes al desorden y variedad. Sin embargo, el índice de Shannon no tiene ninguna referencia a un sistema

		conocer de modo preciso la ubicación espacial y energética de un sistema de partículas.		termodinámico. Por lo cual, se comete errores de hablar de cambios de propiedades energéticas utilizando este indicador.
--	--	---	--	--

Fuente: Elaboración propia

Es importante distinguir los tres tipos de entropía y las implicaciones de cada uno. Al pertenecer a una disciplina externa a la economía tiende a utilizarse incorrectamente. Cada definición se asocia a un campo de análisis específico: la termodinámica, la mecánica estadística y la teoría de la información. Es importante no deducir implicaciones erróneas desde la utilización de un término específico.

A partir de la obra de Georgescu-Roegen (1971) *The Entropy Law and the Economic Process*, en la disciplina económica se abrió una puerta para adherir las implicaciones energéticas y materiales de los procesos económicos desde el enfoque de la primera definición, relacionada a la entropía como variable termodinámica. Este aporte representa una base fundacional de la economía ecológica (Jakimowicz, 2020). Tal como se apuntó en el capítulo 1, la economía ambiental hasta el momento no enfatiza en las variaciones y consecuencias del desgaste energético. Por ello, en esta tesis se deja claro que se utiliza la deducción de entropía termodinámica para hacer referencia a los cambios que sufre la energía derivados de cualquier actividad económica y que se convierte en un problema para la reproducción del ciclo. Estos detalles se verán más adelante.

2.1.2 Termodinámica y proceso económico

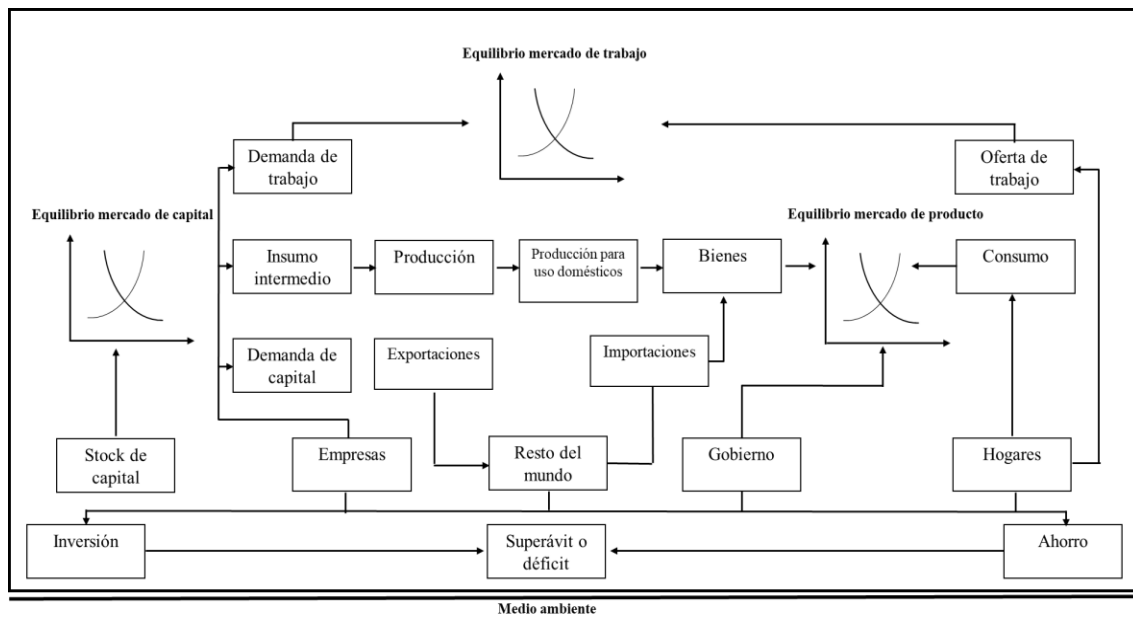
2.1.2.1 Primera ley de termodinámica: el mito energético

A pesar de lo evidente que resulta el desgaste energético en cada acto de producción, algunos de los grandes economistas como Robert Solow y Joseph Stiglitz (1997), frente al cuestionamiento de Daly (1997), omiten esta posibilidad por la dificultad de incorporarlo en los modelos o porque está expresado de forma implícita en las funciones de costo. Además, señalan que la idea de crecimiento ilimitado que proviene de los modelos canónicos de crecimiento económico depende del grado de sustituibilidad entre energías renovables y no

renovables, asumiendo la intensidad del progreso técnico como sustituto de los rendimientos de los insumos ambientales.

Esta visión imperante que predomina en la economía tradicional tiene relación con la primera ley de la termodinámica descrita unas líneas arriba. En efecto, la figura 2.3 muestra un esquema utilizado de forma tradicional para describir el proceso económico desde una perspectiva de sistema cerrado.

Figura 2.5 Componentes del equilibrio general y el medio ambiente



Fuente: Ciarli y Savona (2019)

Desde su aparición, la economía como disciplina científica está muy ligada al desarrollo epistemológico de la física, particularmente a la mecánica clásica. Para ejemplo las palabras de Jevons " (...) si la economía va a ser una ciencia en absoluto, debe establecerse como una mecánica de utilidad e interés propio" (Mayumi y Gowdy, 1999). Bajo esta idea, el sistema económico se concibió como un núcleo cerrado sin interacción con el resto de sistema, en el cual los precios se determinan a partir de la escasez y los mercados tienden hacia el equilibrio. La figura 2.5 muestra a nivel macro la cerradura gracias al equilibrio simultáneo en los mercados del capital, mercado de trabajo y mercado de productos. Mientras, a nivel microeconómico, los productores y consumidores maximizan

ganancias y utilidad.

Sin embargo, es relevante observar que la cantidad de transacciones que se realiza en una economía abierta pero ontológicamente cerrada, se efectúa sin repercusiones en los balances energéticos. Si bien se ilustra que el núcleo económico no está aislado (porque existe otros sistemas como el ambiental), no existen interrelaciones que modifiquen los niveles energéticos. Es decir, siguiendo el postulado de la primera ley de termodinámica cuyo principio anuncia, de forma general, que todo calor se convierte en trabajo, entonces, en una economía de equilibrio general todos los insumos se transforman en mercancías. Razón por la cual, puede concluirse que la cantidad de energía es constante y nunca se degrada, fortaleciendo la idea de producción económica ilimitada por la disponibilidad energética invariable.

La economía neoclásica y ambiental están construidas bajo la ley de la conservación de energía, por ello no existe preocupación por la cantidad de energía y materia disponible en cada proceso productivo. Es un claro ejemplo que desde las condiciones axiomáticas puede restringirse la relación entre la economía y el medio ambiente.

2.1.2.2 Segunda ley de termodinámica: el arribo de Georgescu-Roegen

Contra las limitaciones ontológicas del esquema dominante, aparece uno de los críticos e intelectuales más importantes del siglo XX a quien se le atribuye el surgimiento de la bioeconomía como campo de estudio de la economía a través de ciclos de materiales y flujo de energía. Georgescu-Roegen perteneció a esa corriente de espíritus innovadores con clara conciencia de ser un científico revolucionario. Su entusiasmo intelectual disidente lo condujo por la lógica, la filosofía de la ciencias y epistemología, protagonizando controversias con la forma tradicional de crear ciencia económica.

Si bien al economista y matemático rumano se le atribuye ser el padre fundador de esta corriente, existieron al menos un par de esfuerzos para representar la producción y el consumo económico consistente con las leyes de la termodinámica. El químico Wilhelm Ostwald (1907) señaló que la eficiencia de los ciclos termodinámicos permitiría el desarrollo

de las civilizaciones. Años más adelante, Ayres y Kneese (1969) en su trabajo seminal realizan un modelo de equilibrio general para incorporar el balance de energía y análisis de exergía (potencial de trabajo de una sustancia), considerando que ambas variables son útiles para medir el desgaste de los recursos y la cantidad de residuos.

Posteriormente a estas escasas referencias sobre los balances energéticos, Georgescu-Roegen (1971) muestra que la segunda ley de termodinámica, la ley de entropía, es un elemento abandonado en el análisis. Integrarlo como resultado del proceso económico rompe con la noción de linealidad causal, la reversibilidad, el espacio y el tiempo. Debido que todos los procesos que acontecen en la naturaleza producen inevitablemente incrementos de la entropía, Eddington (1928) se refirió a ella como la "flecha del tiempo".

A partir del trabajo de Georgescu-Roegen, existen una serie de aportes que han sido destacados por varios autores. Particularmente, uno de los principales discípulos y estudiosos de Georgescu-Roegen, Kozo Mayumi (2017), señala que la entropía tiene al menos las siguientes implicaciones para la economía:

- Permite capturar la evolución del ciclo económico en su dimensión energética y material.
- Proporciona una base para la evaluación de tecnologías y su desempeño en sustentabilidad.
- Más allá del avance tecnológico, la materia y energía no puede crearse, así que no puede nunca ser un sustituto de los bienes naturales.
- Establecer relaciones con el espacio geográfico y ambiental centradas no únicamente en lo monetario.
- Plantear los límites del crecimiento económico, la capacidad limitada de reciclar los desechos y la irreversibilidad de los procesos económicos.

2.1.3 Irreversibilidad de los procesos económico y de ciclos ecológicos

Para Mayumi (2016) es importante especificar en términos termodinámicos a qué se hace referencia con irreversibilidad. Todo radica en referencia a la fórmula (2.3) donde se establece la entropía generada en el Universo como sistema aislado, los sistemas no aislados

y el entorno. Para ello se utiliza la desigualdad de Celsius. Esta ecuación señala que la generada en el Universo, recordando (2.3) $\Delta S_{universo}$ puede obtenerse a partir de dos estados termodinámicos¹⁴ A y B, de tal manera que la variación entre ambos puede estimarse como la integral del calor entre la temperatura

$$\Delta S_{universo} = \int_A^B \frac{\Delta Q}{T} \quad (2.4)$$

Si (2.4) es un proceso reversible, entonces

$$\Delta S_{universo} = 0 \quad (2.5)$$

Si (2.4) es un proceso irreversible, se tiene que

$$\Delta S_{universo} \geq 0 \quad (2.6)$$

De esta manera, (2.5) implica que un proceso irreversible la entropía es creciente, mientras que (2.6) implica que un proceso es reversible y la entropía se mantiene constante en el sistema. Dichas deducciones son fundamentales para la economía. En efecto, como se apuntó, la economía neoclásica se construye cual si fuera un sistema aislado donde la entropía se mantiene constante pues todo el trabajo se convierte en calor [ecuación (2.1)], en términos económicos, todo insumo se convierte en mercancías generando un equilibrio simultáneo en todos los mercados y sin generar alteraciones en los balances energéticos y materiales del sistema. De aquí se deriva que el núcleo tradicional de la economía todo proceso es reversible sin ningún costo energético o degradación. Por ello, en el análisis neoclásico aplicado al medio ambiente, el problema ecológico se considera una externalidad y el sistema puede retornar a la situación ideal, puesto que (2.1) y (2.5) se obtiene:

$$\Delta U = \Delta S_{universo} = 0 \quad (2.7)$$

¹⁴ En física un estado termodinámico es un conjunto de valores que caracterizan las propiedades de un sistema, por ejemplo, el calor Q y la temperatura T (Ben-Naim, 2012)

A diferencia de la visión mecánica en la economía, integrar la entropía no puede deducirse (2.1), (2.5) ni (2.7) debido a que cualquier proceso de transformación de insumos necesariamente implica pérdida de calor que no puede convertirse en trabajo [ecuación (2)]. Por esa razón, el proceso económico, recordando que en su génesis cualquier mercancía es una transformación de baja en alta entropía, tiene como condición (2.6). En la dinámica del sistema económico abierto y en interacción no crea ni destruye energía, sólo transforma entropía que se traduce en desechos y residuos para el sistema ecológico, siendo un límite para la idea de producción ilimitada. La ecuación (2.6) advierte de la entropía creciente del proceso económico y por tanto los cambios cualitativos en el sistema ecológico que rompen con sus ciclos y equilibrio. Se rompe con la neutralidad de la dinámica económica sobre el ambiente que supone la economía tradicional.

2.2 Sistemas Complejos y economía evolutiva: integración de la entropía al espacio de interacciones

2.2.1 Sistemas cerrados vs sistemas abiertos

Como se ha venido señalando, un aspecto deficiente del análisis económico tradicional es el núcleo epistemológico de referencia. Tal como se mostró en el capítulo 1, las bases de la economía marginalista y la economía neoclásica fueron influidas por las ideas de la física, particularmente la mecánica clásica. Por lo cual, la economía fue vista como un núcleo sujeto a leyes universales de comportamiento.

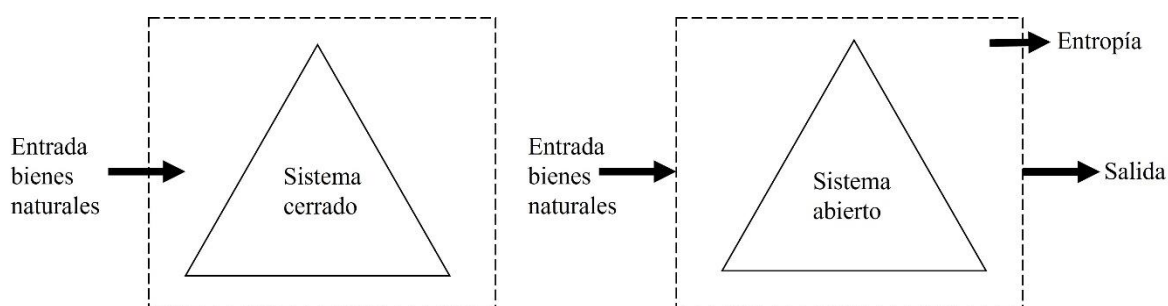
La visión mecanicista determina el tipo de sistema e interacciones. Siguiendo a Fieguth (2017), la economía neoclásica que está detrás de la economía ambiental se basa en un sistema cerrado, es decir, aquel sistema donde la energía y materia no atraviesa sus fronteras. Por ejemplo, el ciclo económico hace uso de distintos bienes y servicios ambientales, aunque se asume que se transforman completamente en mercancías, por lo cual, no transfiere nada al exterior.

Sin embargo, la naturaleza de sistemas cerrados representa una de las deficiencias más

importante para integrar la dimensión ecológica en el análisis económico. En contraposición, integrar elementos de la naturaleza como la termodinámica, específicamente, la entropía, permite reconocer la dependencia del sistema económico y social de la naturaleza. Uno de los elementos diferenciadores del escenario de interacciones propuesto es el tipo de sistemas. Cuando se trata de un sistema abierto, se trata de un espacio que permite la transferencia de energía y materia más allá de la frontera.

Desde esta perspectiva, un ciclo económico de forma inherente genera residuos, desechos y emisiones que afectan la disponibilidad de recursos para el siguiente proceso y altera las funciones de los ecosistemas. La figura 2.4 muestran la diferencia entre ambos tipos de sistemas

Figura 2.6 Sistemas cerrados y sistemas abiertos



Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Economía evolutiva como enfoque integrador

Un elemento clave para integrar las dinámicas del espacio económico, social y ambiental dentro de un mismo escenario conceptual es la economía evolutiva. Este enfoque integrador permite capturar los cambios cualitativos y cuantitativos que implica la interacción multisistemas. La finalidad es mostrar la manera en que la interacción entre el sistema social, ambiental y económico dentro de un contexto de cambio climático produce una reconfiguración de las prácticas individuales y productivas a través del potenciamiento de nichos de tecnologías renovables. Así, el proceso de innovación que induce la transición energética es un proceso emergente que implica la reducción entrópica.

Como se explicó en el apartado previo, las repercusiones del cambio climático en la estructura económica y el comportamiento de los actores exige concebir sistemas abiertos donde existe intercambio de energía, los agentes interactúen con su entorno e internalicen en sus acciones la conciencia del problema ecológico resultado de la actividad económica. Desde la economía evolutiva, es posible concebir una idea similar donde se asume que las estructuras económicas son estructuras diapositivas que absorben energía e información para desarrollar la estructura económica Dopfer y Potts (2009).

En efecto, siguiendo a estos autores la economía evolutiva se basa en la autoorganización de los agentes, la dinámica de cambio de sistemas abiertos y evolución en el tiempo de las distintas estructuras. En consecuencia, la economía integra un carácter dinámico y complejo.

Siguiendo esta postura, el elemento de cambio central en este enfoque es el conocimiento¹⁵. El marco de referencia analiza la economía como un sistema sujeto a cambios constantes donde la población posee reglas y conocimiento bajo las cuales consolidan una serie de instituciones y formas de intercambio.

Desde una perspectiva evolutiva, el ser humano es el punto de referencia capaz de crear, adoptar y adaptar reglas (falta agregar definición de reglas). Estas reglas están sujetas a tres axiomas: el primero, la bimodalidad, hace referencia a las actualizaciones de las ideas en el tiempo; la segunda, el proceso, se refiere a la conformación de poblaciones que siguen las mismas reglas. Finalmente, el tercer axioma, asociación, establece que dentro de un conjunto cambiante surgen nuevas entidades o instituciones, desaparecen, organizan o se adaptan a las condiciones temporales y espaciales determinadas. Este proceso requiere de un

¹⁵ Desde la perspectiva de Dopfer (2005), la economía evolutiva descansa sobre tres pilares: i) Reconoce que todos los fenómenos reales son actualizaciones físicas de información o, de manera equivalente, información actualizada como materia-energía. ii) Reconoce las existencias como relaciones y conexiones. Las entidades de materia-energía, como “portadoras” de información, se consideran conectadas entre sí. iii) Reconoce las existencias como proceso. Un proceso se concibe como asociaciones o como estructura en el tiempo.

mayor detalle, que será explicado en el apartado siguiente y permitirá desglosar el escenario de interacciones.

Cuadro 2.2. Visión del mundo

Economía neoclásica	Economía evolutiva/institucional
Relación con el mundo natural a partir del dualismo cartesiano	Imagen del mundo darwinista, considerando elementos naturales
Humanos no depende del ambiente	Interdependencia con los objetos
El mundo es estable a partir del óptimo social	El mundo es dinámico y sujeto a leyes de autoorganización. No existe equilibrio
El mundo el predecible a partir del comportamiento individual	Mundo impredecible, incertidumbre, cambiante
Información perfecta, ser humano como calculadora (Shackle (1990))	Restricción de la información, transformación de reglas y patrones

Fuente: Modificado de Horodecka (2017)

El cuadro 2.2 resume los principales elementos que caracterizan a la economía evolutiva. La primera diferencia respecto la economía neoclásica que se vuelve esencial para introducir la noción ambiental al análisis es la dependencia de la vida humana y actividad económica de la naturaleza. Desde el siglo XVIII, gran parte del pensamiento moderno se desarrolló entendiendo la relación ser humano-medio ambiente bajo el dualismo cartesiano, separando el comportamiento humano de su entorno ecológico y natural, consolidando así una relación de dominio. Sin embargo, la economía evolutiva considera esencial explicar la relación de dependencia con la esfera ecológica.

El mundo neoclásico tiene como elemento clave la noción de equilibrio. La racionalidad económica provoca que los agentes en búsqueda de maximizar su utilidad compatibilicen las decisiones tanto los productores y consumidores. El equilibrio resulta el punto de mayor bienestar para la sociedad. En cambio, desde una perspectiva evolutiva, el mundo no tiene ninguna trayectoria marcada hacia el equilibrio a causa de la incertidumbre. En su lugar, la economía se distingue por su inestabilidad y al mismo tiempo la creación de estructuras de organización y jerarquías.

La principal diferencia entre ambos enfoques radica en la distinción ontológica del agente económico. Se pasa de un determinismo neoclásico basado en la racionalidad perfecta

y el procesamiento de toda la información disponible hacia la conceptualización de un individuo cuya decisión económica está determinada por su estructura cognitiva sujeta a la evolución de la especie, el conjunto de ideas cambiantes por influencia de la estructura social, los límites intelectuales y las barreras a la información.

Cuadro 2.3. Comportamiento humano

Economía neoclásica	Economía evolutiva/ institucional
Ser humano estático, racional, autosuficiente. Homo Economicus	Ser humano cambiante, racionalidad limitada, no autosuficiente, adapta al sistema
Ahistórico, agente representativo	Dentro de una cultura, sociedad, tiempo
Homogéneo	Heterogéneo
Atomista	Holístico
Comportamiento reducido	Comportamiento complejo
Optimizador	Satisface función objetivo

Fuente: Modificado de Horodecka (2017)

El cuadro 2.3 muestra las diferencias conceptuales sobre el comportamiento humano. Destaca el principio de racionalidad limitada, así como la ruptura del agente representativo y la consideración de múltiples agentes poseedores de estructuras mentales propias y moldeadas dentro de entornos culturales y sociales específicos. A diferencia del criterio racional sustentado en la maximización del beneficio, el agente evolucionista intenta cumplir una función determinada en el conjunto de reglas y normas sociales vigentes. De tal forma, la función objetivo de los agentes es cambiante acorde a los motivos endógenos al sistema.

Articulando los conceptos clave, la dinámica del sistema depende de la evolución de ideas que se desarrollan en la mente de cada individuo; a su vez, el conjunto de conocimientos es cambiante y se determina por el conjunto de instituciones a nivel social. Con el fin de internalizar los efectos del cambio climático y entropía dentro de la dinámica de los sistemas abiertos, será importante conceptualizar una serie de categorías que permitirá integrar la esfera ecológica en el diagnóstico. Para lograr este fin, se requiere utilizar un agente económico que sea capaz de integrar la evolución del conocimiento e ideas en sus decisiones

y explicar la respuesta endógena del sistema frente a la creciente entropía a causa de la actividad económica.

2.2.3 Escala macro, meso y micro

La dinámica social trazada en los modelos de inspiración neoclásica se concentra fuertemente en la esfera micro, es decir, la dinámica económica es resultado de las decisiones individuales. A partir de las pautas de comportamiento del empresario o los consumidores, es posible deducir el comportamiento agregado.

En efecto, bajo la idea de agente representativo, la dinámica agregada es resultado de la suma de comportamientos a nivel individual. La consecuencia metodológica de este procedimiento es la falta de claridad entre la dimensión macro y micro. Por un lado, el nivel micro del comportamiento restringe el comportamiento humano al comportamiento racional y por otro, el nivel macro resulta simplemente en la suma de acción micro.

El espacio analítico tradicional deja de lado aspectos relevantes para integrar las sinergias del espacio ecológico y es incompatible cuando se trata de sistemas abiertos. Los principios de la economía evolutiva plantean la necesidad de expresar la dinámica de los individuos y poblaciones desde una perspectiva multinivel, más si se trata de vincular la dinámica social y su dependencia del medio ambiente.

Siguiendo la propuesta de Dopfer *et al.* (2004), el marco micro-meso-macro permite integrar las normas de comportamiento, socioculturales, organizativas, técnica e institucionales de toda sociedad. Se busca explicar el conjunto de interacciones sociales a partir del comportamiento individual enmarcado en un marco histórico particular. El esquema permite conectar los tres niveles coevolutivos de análisis.

A nivel *microeconómico* se sitúa el análisis de los actores portadores de reglas que, de acuerdo con su estructura cognitiva, analizada más adelante, tienen el potencial de crear reglas, adaptar y adoptar. El individuo al contar con una capacidad neuronal dentro de un contexto histórico y cultural particular, siendo poseedor de conocimiento e ideas que le permiten resolver problemas particulares. En este nivel, existe un conjunto amplio y variados

de reglas. De manera general, en el sistema existe una función objetivo como meta y que sirve de referencia para los individuos, la regla exitosa será objeto de réplica.

El espacio meso es el más importante desde la mirada evolutiva. La microactualización de las reglas a nivel micro genera que un conjunto de individuos a nivel local se adapte e impulsen la misma regla formando así poblaciones. Siguiendo a Dopfer *et al* (2004) y Foster y Potts (2009), la dinámica de cambio a escala meso puede analizarse como una mesotrayectoria constituida de tres etapas: i) En el nivel 1, se introducen los nuevos conocimientos que permiten perturbar la estructura de mercado, tanto productiva y de consumo. ii) El nivel 2 refiere a la dinámica de poblaciones que adoptan la regla. Habrá distintos productores que intentarán replicar y adaptarse en un entorno de incertidumbre. Siguiendo a los autores, existen empresas líderes que segmentan el mercado a favor de sus servicios y aquellas que son expulsadas por su falta de competencia. iii) El último nivel se refiere al proceso de retención y estabilidad de las reglas. Al consolidarse una estructura en torno a la nueva regla es fácil su replicación a mayor escala en gran medida impulsado por el crecimiento de la población que adquirió la regla formando nuevas industrias locales, nichos de mercado o reorganizando los existentes.

Finalmente, vinculado a los tres niveles de análisis y estabilidad de la mesotrayectoria, *la escala macro* refleja la consolidación de la mesotrayectoria de manera agregada. En este nivel es posible visibilizar la forma final de la coordinación poblacional y la reconfiguración de las reglas.

El análisis micro-meso-macro, de manera preliminar, amplía la comprensión de la dinámica económica. Esta aproximación deja claro la imposibilidad de agregar los comportamientos individuales para analizar el espacio macro, adicionalmente, incorpora un campo de interacciones dinámico como el nivel meso y va más allá del comportamiento racional. Sin embargo, es necesario seguir ampliando los elementos para entender el proceso de innovación en un contexto entrópico y desarrollar los microfundamentos que permitan comprender y desarrollar el análisis de transición energética del capítulo 3.

2.2.4 Homo Sapiens Economicus frente al individualismo metodológico

Como se apuntó previamente, el centro del análisis radica en la comprensión del comportamiento humano desde su aspecto cognitivo hasta su interacción social dentro de un marco institucional definido. Como figura se recurre al Homo Economicus Sapiens (HES) concepto desarrollado por Dopfer (2004). El HES sigue el método del realismo lógico por lo cual sus decisiones dependen de una estructura cognitiva propia y del conjunto de reglas y hábitos creados a nivel social. Es decir, el comportamiento humano se explica por la voluntad individual y la interacción con el resto de los agentes.

La teoría económica se edificó bajo la figura de un agente ficticio basado en el principio de racionalidad perfecta. Thaler (2000) señala que los avances de la microfundamentación de la teoría dotaron de una inteligencia máxima al Homo Economicus debido a su capacidad de tomar toda la información a su alrededor para la operatividad de sus acciones. De este modo, la racionalidad perfecta permite explicar el comportamiento agregado¹⁶ a partir de la suma de comportamientos individuales. Como resultado, la acción individual y colectiva es determinado por factores externos dejando de lado todos los factores internos que vuelven dinámico el tránsito económico.

La ontología del HSE es un cambio metodológico para el desarrollo de la economía. De acuerdo con mismo Dopfer (2006), este agente retoma la figura del Homo Sapiens como ente biológico y figura central de la dinámica a nivel micro y meso. Este individuo es resultado de la evolución cuyo origen se remonta hace 2 millones de años con la aparición

¹⁶ En el desarrollo epistemológico de la economía neoclásica se concibe esta figura como la expresión más abstracta del comportamiento humano. El objetivo fue la abstracción del ser humano a un estadio mínimo que fuera concebible a cualquier época de la evaluación social. De acuerdo con los defensores de esta visión, no es relevante considerar elementos cambiantes como el nivel de riqueza, la clase social, el contexto histórico o posición económica para analizar el comportamiento humano; sin importar los factores enlistados, los seres humanos siempre y en cualquier momento buscarán el máximo provecho de su consumo. Por lo cual, las mercancías tienen valor siempre y cuando sean de utilidad para los consumidores. Desde este punto el interés del proceso económico radica en el consumidor como la figura estrella pues de su actuar depende la dinámica del sistema. Esta configuración ha sido la construcción teórica sobre el actuar humano que se conjuga perfectamente con la definición de Robbins (1944) acerca del objetivo de la economía cuyo fin es el estudio de los medios para lograr ciertos objetivos.

de los primeros homínidos. Fue hasta hace 120,000-100,000 años que apareció lo que fue clasificado como el ser humano moderno, el Homo Sapiens.

De acuerdo con diversos estudios antropológicos¹⁷, el Homo Sapiens pudo separarse del resto de los homínidos debido a su capacidad de lenguaje, comunicación y aprendizaje. Estos elementos le permitieron construir elementos que constituyen una cultura, entendiéndola como el conjunto de ideas, creencias, saberes, herramientas y comportamientos que definen a una comunidad (Lévi-Strauss, 1969). El Sapiens supera a todos los demás primates en la autopercepción y el uso del lenguaje simbólico, permitiéndole una comunicación social eficaz con su entorno.

Para Dopfer y Potts, es relevante entender que el cerebro del Homo Sapiens es el objeto sobre el cual la evolución operó permitiendo que se construyera un complejo entramado de interrelaciones. La inteligencia del Homo Sapiens se conduce por un lineamiento de conducta que organiza acciones, es decir, el comportamiento individual y social está regido por reglas¹⁸. De esta manera, el ser humano desde su origen es creador y usuario de reglas que permitió el desarrollo de idioma, la cultura y la economía. Bajo estos argumentos, la corriente analiza la evolución de las reglas cuando el Homo Sapiens se enfrenta a decisiones económicas y toma el rol de HCES.

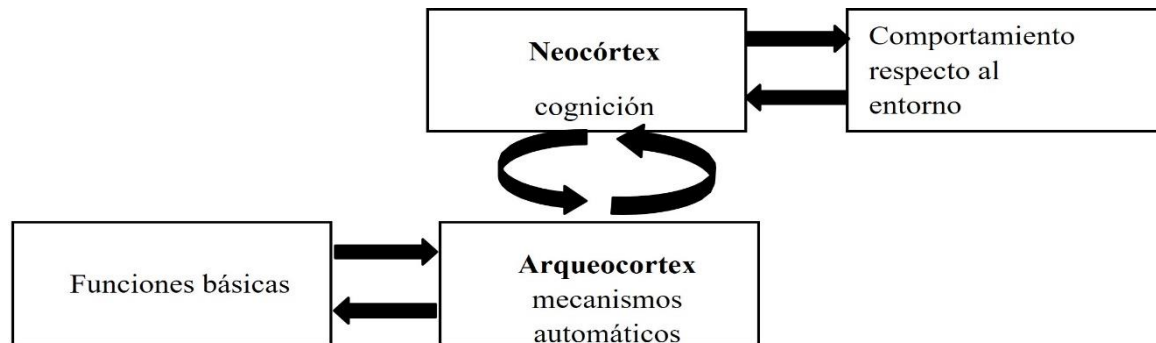
Debido a que el mecanismo evolutivo ha funcionado sobre el cerebro, del cual surgen las ideas y el conocimiento que hacen posible la dinámica del sistema, el comportamiento de HCES está conformado por dos estructuras. La primera es el arqueocortex que involucra a los mecanismos neuronales viejos encargado de las funciones automáticas como el habla, las emociones, etc. Al ser un espacio cognitivo heredado por la evolución humana sus funciones no dependen del conocimiento acumulado ni el flujo de ideas ni la influencia social. El segundo es el neocórtex que está constituido por las conexiones neuronales encargadas de resolver problemas del entorno o emergentes. Estos dos elementos más adelante nos darán

¹⁷ Véase por ejemplo Valdebenito (2007)

¹⁸ Por regla se utiliza el término de Metcalfe y Foster (2001) quienes definen a las reglas como un conjunto de esquemas deductivo estructurado que permite realizar operaciones determinadas

pauta para explicar la internalización del problema ambiental entre los individuos. Hasta aquí se afirma la complejidad mental de los agentes que influye en la toma de decisiones más allá de una racionalidad instrumental.

Figura 2.7. Estructura cognitiva del HCES.



Fuente: Dopfer (2004)

2.2.5 Reglas, hábitos, rutinas e instituciones

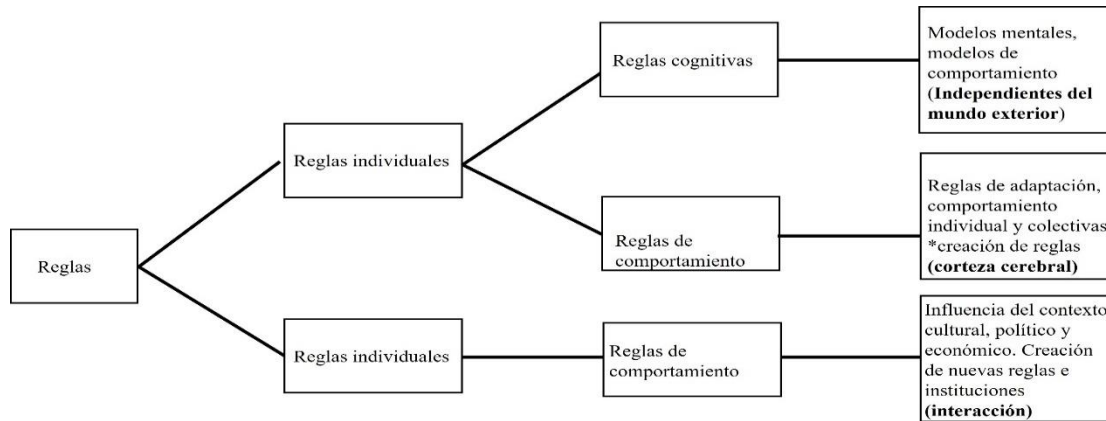
Como se ha venido señalando, el HCES es un individuo que utiliza y crea reglas en todos los espacios de acción permitiéndole poseer pautas de comportamiento. Como se ilustra en la figura 2.7, todo conocimiento e idea circulante en el sistema es apropiado desde una estructura mental.

La manera de apropiarse de la información es a partir de reglas, tal como se mostró líneas atrás, es el centro de la micro y meso dinámica. En efecto, las reglas son mecanismos que permiten filtrar el conocimiento y darle una estructura. Dopfer (2001, 2004, 2005) y Nelson *et al.* (2018) han jerarquizado al conjunto de reglas que poseen y construyen los individuos. En la figura 2.8 las reglas se dividen en 2 grandes ramas. El primer conjunto de reglas son las individuales que se encarga de las reglas cognitivas refiriéndose al conjunto de modelos mentales *ex ante* que determinan el comportamiento individual. Por ejemplo, el carácter, las emociones, las actitudes, etc.

El otro conjunto de reglas se refiere al comportamiento. Son resultado de la interacción de los individuos con otros individuos poseedores de distintas configuraciones cognitivas. En el encuentro de individuos, las reglas de cada parte cambian y evolucionan.

Piense en dos personas de distintas nacionalidades que al interactuar crean una forma de comunicarse (una regla). En esta interacción y modificación de la regla está involucrado el arqueocortex.

Figura 2.8 Clasificación de reglas



Fuente: Elaboración propia con base en Dopfer (2004, 2005) y Nelson et al. (2018)

Siguiendo esta clasificación, el último conjunto de reglas son las organizacionales, particularmente las reglas del entorno. Esta dimensión permite ir más allá del espacio micro y transitar a la esfera más importante desde la economía evolutiva: la escala meso. Las reglas organizacionales reflejan el carácter social del HES pues se concibe como un agente con potencialidades cognitivas propias que filtra la realidad a partir de reglas construidas y además es parte de un conjunto más amplio de interacciones con otros agentes con estructuras cognitivas y reglas diferenciadas.

La postura evolutiva es adecuada para romper con el determinismo neoclásico, particularmente la figura del agente representativo, ubicándose en un espacio donde se actualizan y crean reglas resultado de la interacción entre individuos y se enfrenta a reglas que son resultado de la evolución social tales como la cultura, el sistema económico, el sistema político y el paradigma tecnológico.

Ahora, entendiendo que las reglas individuales y organizacionales se usan, crean y actualizan a causa de la interacción entre individuos heterogéneos y por influencia de un

contexto particular, es relevante explicar el mecanismo que explica la interacción entre los individuos y que permite crear estructuras y preservar el conjunto de reglas a nivel de población¹⁹. Considerando la influencia tanto de la interacción entre individuos heterogéneos y el papel del contexto meso sobre el conjunto de reglas, es relevante señalar la manera en que se interrelacionan los individuos a partir de un conjunto de reglas comunes. Esto es gracias a los hábitos e instituciones.

Efectivamente, la economía institucional fundada por Thorstein Veblen²⁰ tiene como elemento principal explicar la forma en la cual las personas organizadas interactúan entre sí y con su ambiente (Bateira, 2010). Esta idea es retomada por los teóricos evolucionistas para explicar el crecimiento del tejido social. El punto de partida son las reglas. Cuando una forma de pensamiento estructurada se normaliza, de acuerdo con Veblen (1899, 2017), se convierte en un hábito²¹ entendido como la repetición de una cierta acción. Los hábitos tienen como origen la estructura cognitiva de pensamiento y termina convirtiéndose en una práctica compartida con ciertos individuos.

La interacción entre los individuos depende de los hábitos y las reglas, sin ellos no podría explicar los motivos para que los individuos actúen. Volviendo a la contraparte neoclásica, las acciones del Homo *Öconomicus*, bajo el principio de racionalidad perfecta, son operativas más no existen elementos endógenos que expliquen sus decisiones²². Por otro

¹⁹ Desde una perspectiva evolutiva, una población es un conjunto de agentes heterogéneos que comparten una estructura de reglas similar.

²⁰ En los debates actuales de la economía institucional, se considera a Veblen, Polany Hayek como fundadores de esta corriente. Autores como Chavance (2008) los considera el viejo institucionalismo. En este trabajo interesa debatir la evolución de esta corriente, por lo cual, las categorías a las que se haga referencia estarán más cerca del viejo institucionalismo. Existen autores que defienden la vigencia de esta corriente fundadora tal como Jeannot (2020) quien señala a la Nueva Economía Institucional basada en la matematización de sus principios acercándose peligrosamente a la gran abstracción que hace la economía neoclásica.

²¹ Piense por ejemplo en un encuentro entre un sujeto A y un sujeto B sin conocerse previamente, la estructura mental programada de ambos es saludarse si ambos se sienten seguros en la situación (reglas cognitivas de protección). Esta regla repetida varias veces se convierte en un hábito de convivencia social.

²² En un modelo de equilibrio general, el proceso de transacciones se realiza suponiendo que los agentes acuden al mercado con sus preferencias de consumo incorporadas, tanto como productor y consumidor, definidas. Lo único que debe definir es el orden de utilidad que le proporciona cada bien. Sin embargo, la forma de explicar el origen de sus preferencias es totalmente exógeno.

lado, la estructura cognitiva, las reglas y hábitos del HSCE permite explicar adecuadamente el origen de sus decisiones económicas teniendo en cuenta el espacio meso sin perder en ningún momento la base micro (gracias al neocórtex y arqueocortex)¹⁹.

Gracias a las instituciones, el sistema en su conjunto logra ser estable²⁰ y reproducir la vida y hábitos socialmente aceptados. La interacción y dinámica de los individuos crea instituciones. En esta vertiente Nelson (2003) da peso específico a la evolución de la cultura y la sociedad que permitió las condiciones necesarias para la existencia de las instituciones. Para Bateria (2010), las instituciones representan las costumbres aceptadas entre los individuos y la población, de tal manera que deben pensarse como estructuras que dependen de los acuerdos a nivel social más no como elementos abstractos.

Rutherford (1998) por su parte insiste en que las instituciones únicamente existen gracias a la interacción de los individuos. En suma, las instituciones son creadas por el conocimiento y asimismo crean conocimiento. De esta manera, las instituciones son los acuerdos que permiten integrar de manera lógica el análisis micro hacia el análisis meso. La evolución de las instituciones implica actualización de las reglas

2.2.6 La respuesta creativa del sistema frente al cambio climático: una perspectiva de innovación desde un enfoque evolutivo y complejo

Explicar la dinámica de sistema abiertos implica necesariamente conceptualizar los procesos coevolutivos a los tres niveles referidos. Para ello, algunos de los mecanismos descritos más adelante harán referencia a propiedades característicos de Sistemas Complejos Adaptativos (SCA). Existe un gran número de conceptualizaciones acerca de SCA, en gran medida por la ausencia de un criterio único (Seager, 2011). Sin embargo, es posible obtener rasgos comunes en las definiciones. Los SCA son un conjunto de relaciones dinámicas entre elementos heterogéneos que realizan una tarea conjunta que de manera individual no podrían realizar (Castaings, 2015; Holland, 2002; Thomas, 2016). A pesar de lo profundidad del debate en este tema, únicamente se hará referencia a ciertas categorías que permitirán la mejor

interpretación del esquema de integración²³.

El cuadro 2. 4 muestra las categorías relevantes para explicar la dinámica de integración. Como se indica, una de las propiedades relevantes es la interdependencia entre los elementos heterogéneos. Un aspecto clave es la existencia de reglas que vinculan el comportamiento de los individuos. Si bien se tiende a interpretar los SCA como un efecto causal donde todo causa todo, estas categorías filtran e identifican las relaciones significativas, sobre todo, identifica realmente las retroalimentaciones existentes. Dentro de la gran cantidad de elementos que inciden en la interacción de sistemas abiertos ambiental-económico-social, es importante identificar únicamente la dinámica de aspectos relevantes.

Cuadro 2.4. Categorías y descripción de SCA

<i>Agentes</i>	HSCE heterogéneo que crea y modifica reglas que se adaptan en el tiempo. Forma parte de un contexto cultural e institucional definido
<i>Dinámica</i>	No estáticos lejos del equilibrio, pero sí tienden hacia la estabilidad (homeostasis) manteniendo al sistema entre ciertos rangos. No existe un controlador central
<i>Redes</i>	Elementos interconectados entre sí de manera no lineal determinado por los flujos y reglas del sistema. Existe un proceso de retroalimentación positiva cuando el flujo de salida se convierte en flujo de entrada. La conexión entre elementos se rige por reglas.
<i>Tiempo</i>	Importancia de la dependencia de la trayectoria sobre el estado del sistema. No se tiene como punto de partida el momento t sino la influencia de periodos $t-n$
<i>Evolución</i>	La variedad de entidades del sistema genera un proceso de adaptación y transformación basado en la selección y amplificación
<i>Emergencia</i>	Se refiere a un fenómeno que no está descrito dentro de las condiciones iniciales del sistema reflejando el proceso de adaptación estructural.

Fuente: Elaboración propia con base en Holland (2002) y Tranquillo (2019)

²³ El trabajo no tiene la finalidad de realizar un modelado desde la economía de la complejidad, simplemente se plantea de manera conceptual ciertas categorías que permiten entender la dinámica del esquema de integración.

2.2.6.1 Agentes

Los agentes tienen los atributos HSCE, con ello, evita la generalización histórica y cultural debiendo analizarse a los individuos como sujetos diferentes entre sí y al mismo tiempo con puntos comunes; con capacidades cognitivas limitadas, como la imposibilidad de contar con toda la información del entorno, al tiempo que desarrolla nuevas aptitudes por la interacción social. Por otro lado, su entorno institucional y cultural específico determinan su comportamiento.

En el caso del problema medioambiental que representa el cambio climático, los agentes se desenvuelven en un contexto de incertidumbre sobre el futuro de la reproducción económica y social. A medida que incrementa el nivel entrópico del sistema se reduce las posibilidades de respuesta y sobre todo el tiempo de acción. Gracias a su mecanismo cognitivo, los HSCE son capaces de recibir la información dentro del sistema sobre la gravedad que representa el problema ecológico.

2.2.6.2 Dinámica

La dinámica en sistemas abiertos no está determinada por un controlador central, el conjunto de interacciones parte de las reglas definidas entre los individuos, incrementando así el nivel de incertidumbre sobre el futuro y desempeño del sistema. No es posible definir un punto de equilibrio -como sucede en la economía neoclásica-, en cambio, existe un sendero de valores estables para el objetivo del sistema en su conjunto. La homeostasis es una propiedad de un sistema equivalente a la estacionalidad, situación que permite la replicación de ciertos patrones. Un SCA no es predecible ni se puede calcular con exactitud los valores que tomará, por el contrario, sólo es posible definir su trayectoria entre ciertos valores críticos.

2.2.6.3 Redes

Las redes hacen referencia a mecanismos no unidireccionales que permiten la interacción entre los HSCE y con su entorno. Para depurar las múltiples interconexiones dentro del sistema, es preferible identificar las redes e interacciones de mayor impacto y flujo entre ellas. Las

retroalimentaciones (feedback) darán cuenta de los flujos de mayor importancia entre los elementos. Las interacciones en SCA no son relaciones deterministas sino engendran causalidades diferenciadas. Un elemento puede afectar favorablemente a otro y paralelamente causa efectos diferenciados sobre otros. Las redes permiten identificar aquellas agentes, flujos o elementos del sistema cuyo comportamiento influya fuertemente sobre otros.

2.2.6.4 Tiempo

El tiempo es un factor característico de los sistemas coevolutivos. Toda sociedad está integrada de una estructura artefactual, que se define por aquel conjunto de creencias, instituciones como reglas e incentivos a la vez, herramientas, instrumentos, tecnologías sociales y físicas, todos estos legados por la cultura nacional (David, 2007; Jeannot, 2020). Esta estructura particular es resultado de la evolución histórica de cada aspecto²⁴.

En efecto, los cambios en el sistema son resultado de la influencia del pasado, no son valores que se determinan en automático²⁵, por lo cual, es necesario desintegrar el análisis “hacia atrás” de manera detallada para entender las causas que tienen al sistema en su situación actual. De manera cultural, cada sociedad es resultado del conjunto de valores y creencias gestados en su configuración nacional. Con ello, la idea clave del tiempo es la imposibilidad de separar el estado actual de cada sociedad de su evolución histórica y también la imposibilidad de regresar a una situación histórica previa.

Para capturar estos elementos el término dependencia de la trayectoria (path dependence) es apropiado. Antonelli (2017) asocia este término con el trabajo de Schumpeter (1947) a quien el tiempo histórico es crucial para explicar la situación actual. De esta forma, no hay configuración cultural o institucional que no sea resultado de la dependencia de la trayectoria, es decir, de la evolución de las reglas a nivel histórico. Para David (2007) la configuración institucional es resultado de un proceso dinámico y evolutivo que restringe las

²⁴ Por ejemplo, el desarrollo industrial y tecnológico de las naciones europeas durante el siglo XX no puede explicarse, entre otros elementos, sin la invención de la máquina de vapor de James Watt.

²⁵ En econometría, la idea más cercana sobre “el pasado afecta el estado actual de las cosas” es el uso de rezagos de una variable. Sin embargo, los cambios del pasado sólo son un valor numérico.

posibilidades actuales de éxito al papel de la propia historia. Por lo tanto, el estado actual de las cosas tiene determinantes endógenos del pasado y que son necesarios para cambiar las instituciones presentes.

En el caso del problema ambiental, no es posible comprenderlo sin considerar la intensidad del proceso productivo y las principales fuentes fósiles que alimentan la industria. Es resultado de múltiples configuraciones institucionales y de mercado que propiciaron un sobreconsumo de energías fósiles construyendo a su alrededor una estructura dependiente de las elevadas tasas de consumo. El problema radica en los niveles de consumo, explotación y desecho. En consecuencia, el objetivo de la sociedad, debido a esa influencia histórica, resulta en la necesidad de transformar las prácticas económicas y las fuentes energéticas de consumo, es decir, impulsar el desacoplamiento de las energías fósiles por energías renovables.

2.2.6.5 Evolución

La interacción de sistemas abiertos engendra procesos de retroalimentación entre los elementos. En el análisis tradicional, los fenómenos económicos están determinados por cambios automáticos a causa de modificaciones en su exterior. Por ejemplo, imagine una empresa neoclásica tomadora de precios que frente a cambios en su demanda únicamente v la cantidad de producción. La especificación de la empresa le permite adaptarse al contexto únicamente vía producción. Esta respuesta es la misma para el conjunto de empresas de la industria.

En contraparte, el análisis de la economía evolutiva y la naturaleza de SCA, las empresas, los individuos, instituciones, reglas y hábitos están sujetos a dinámica de cambios diferenciadas gracias a su heterogeneidad entre sí y la disponibilidad de recursos a su alcance. Si bien los actores del sistema no poseen información completa ni certidumbre, cada uno está vinculado a un conjunto de tecnologías y formas organizativas que les permite construir respuestas y alternativas diferenciadas. A diferencia del enfoque mecanicista, la variedad de elementos es el punto de partida para la gestación de respuestas generales. Habrá empresas que tendrán recursos a su alcance para generar propuestas, cambiarán sus hábitos y rutinas,

mientras otras sólo se adaptarán en términos de su disponibilidad.

Los cambios en el entorno de los actores ya sean empresas, instituciones, hábitos o rutinas, están sujetos al principio darwiniano de variedad, selección y replicación. La heterogeneidad del sistema es el punto clave para el cambio. Aquellas prácticas que sean exitosas con relación al objetivo del sistema o agentes serán seleccionadas y replicadas. A pesar de las dificultades de la economía para introducir la metáfora darwiniana sobre la evolución²⁶, en apartados siguientes se intentará rebasar esas limitaciones para identificar los factores que explican el proceso evolutivo del sistema frente al cambio climático y la entropía creciente.

2.2.6.6 Emergencia

Finalmente, desde el enfoque de SCA, un elemento clave para la dinámica conjunta es el concepto de emergencia. Esta categoría se define como el conjunto de fenómenos que son resultado de la interacción entre elementos y cuya naturaleza no responde a las propiedades iniciales. En gran medida, el proceso de retroalimentaciones entre los agentes heterogéneos y su entorno genera que los resultados entre las interacciones conduzcan a procesos emergentes; a su vez, dicho proceso refuerza el proceso evolutivo y coevolutivo.

Al introducir los aspectos energéticos y materiales, las condiciones iniciales del sistema se ven alteradas provocando inevitablemente procesos de interacción y retroalimentaciones causantes de respuestas no previstas. Una característica elemental de los SCA es la imposibilidad de predecir el resultado ni las secuencias de acción.

Este último fenómeno de emergencia junto con la dinámica de sistemas cerrados, el

²⁶ Antonelli (2017) señala una confusión profunda de los economistas cuando se hace uso de la metáfora de Darwin de la evolución al momento de introducirla en la dinámica del sistema económico. Principalmente, el autor establece que la mayoría de literatura económica confunde el principio de evolución de Lamarck y de Darwin. La primera señala que cambios en el exterior (fenotipo) conduce a cambios automáticos en el interior (genotipo). En cambio, la definición más aceptada, Darwin, establece que los cambios en el genotipo son de carácter aleatorio. De aquí se deriva una controversia sobre la aplicabilidad del principio evolutivo. En específico, este elemento es clave en la obra de Nelson y Winter (1985) quienes señalan que la decisión de innovar es un factor exógeno y evolutivo. Sin embargo, el autor señala que la idea de evolución oculta la idea original, los determinantes que motivan a los actores a innovar.

comportamiento del HSCE, la escala micro-meso-macro, el enfoque evolutivo, reglas y rutinas, y las propiedades de SCA, *en conjunto representan las condiciones iniciales que permitirán explicar la dinámica sistemática de los individuos frente al problema del cambio climático*. En los siguientes apartados se desarrolla la respuesta del sistema que permite reducir los niveles de entropía y explicar los elementos generales que anteceden la transición y permiten construir el Modelo Multinivel Bioevolutivo (MMB) Este se considera un aporte al enfoque de transiciones energéticas²⁷.

En efecto, en este primer momento se presenta las interacciones y se explica el proceso de innovación como un elemento emergente resultado de la reconfiguración del sistema. La nueva funcionalidad emergente permite contrarrestar la generación entrópica de los procesos económicos *dando luz en un enfoque evolutivo de innovación en el contexto de cambio climático*. Después, estas bases de la innovación permiten avanzar en el entendimiento de las interacciones dinámicas que dan lugar a una transformación energética²⁸. Más adelante, con la base presentada de la innovación como un proceso emergente en un contexto de cambio climático, se analiza la forma en que la innovación endógena se convierte en un proceso de transición energética que transforma el sistema en su conjunto.

2.2.7 Internalización del problema medioambiental

2.2.7.1 Los efectos de la entropía a escala macro

Como se ha venido señalando, cada apartado avanza en la construcción del marco de

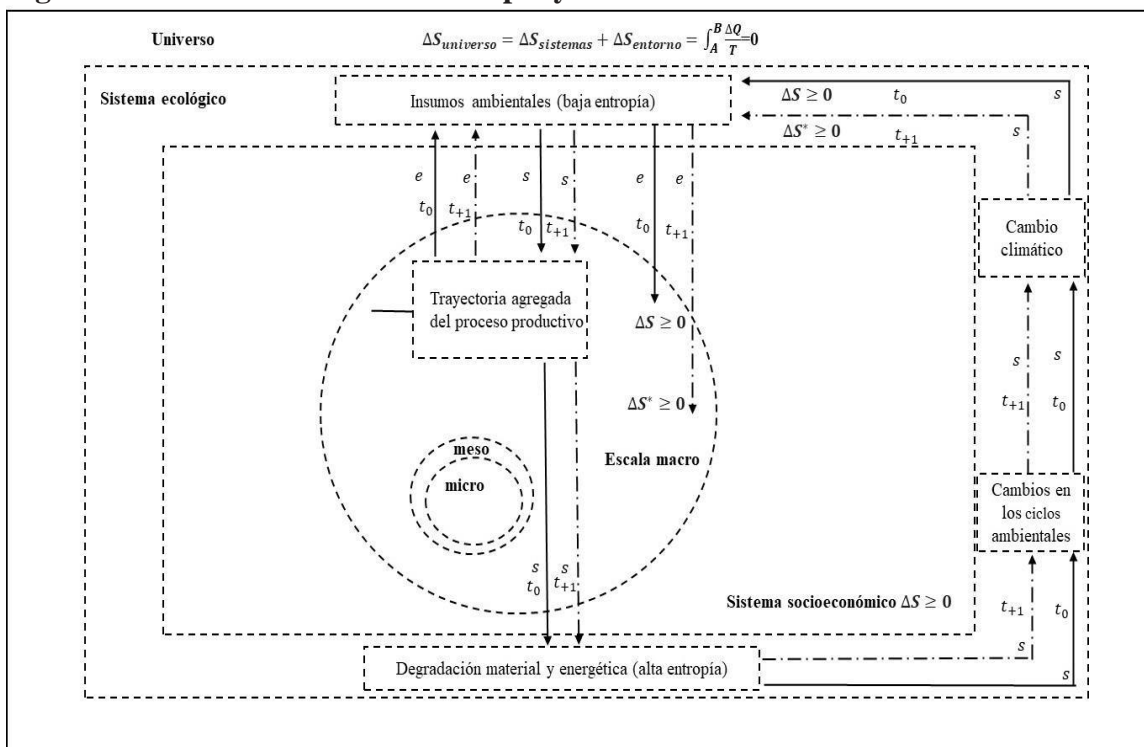
²⁷ En efecto, a la falta de base teórica en el enfoque de transiciones energéticas, es indispensable comprender los aspectos que anteceden a la difusión y transformación del paradigma energético. Por tanto, este esquema de interacciones provee los elementos esenciales para explicar la innovación en un contexto evolutivo y entrópico y posteriormente añadir estos elementos al enfoque de Geels (2019) para entender como las innovaciones desarrolladas se difunden con base a estos elementos que podrían catalogarse como microfundamentos del proceso de transición. Así, el proceso de transición socioambiental se explica como un fenómeno emergente y endógeno al sistema.

²⁸ Es importante recalcar que este capítulo permite comprender la respuesta emergente del sistema frente a los problemas entrópicos ambientales, en este caso, explicar la forma en que se gestan las innovaciones. Posteriormente, estos elementos serán la plataforma para amplificar el estudio de la transición. Es decir, la forma en que las innovaciones se convierten en nichos de transformación del régimen energético vigente en el MMB.

interacciones que permite, en primer momento, comprender el proceso de innovación dentro de una dinámica de sistemas abiertos y efectos del cambio climático. En un segundo momento, intenta ampliar las bases teóricas en el análisis de la transición energética del siguiente capítulo.

La entropía como fenómeno energético es una manifestación de dos consecuencias: i) el alto nivel de desgaste y explotación de los bienes naturales en el proceso de producción debido a la conversión de baja en alta entropía. ii) Al existir interacciones de los sistemas, a nivel macro la creciente entropía se manifiesta en la perturbación de los ciclos naturales. iii) Los procesos económicos serán de carácter irreversible en términos materiales y energéticos, como consecuencia, restringe la capacidad productiva para el siguiente periodo. iv) Al transmitirse sus efectos en la escala meso y micro, en la esfera macro se verán las trayectorias agregadas, las nuevas reglas sociales y los cambios de la esfera productiva

Figura 2.9 Efectos macro de la entropía y cambio climático



Donde:

e: entradas de flujos y stocks materiales-energéticos —: flujo continuo

s: salidas de flujos y stocks materiales-energéticos —: flujo continuo

t_0 : Proceso económico en el periodo actual
abierto - - - - - : sistema

t_1 : Proceso económico en el periodo siguiente

Fuente: *Elaboración propia*

El cuadro 2.9 muestra los flujos energéticos en la escala macro. La entropía en el sistema ecológico, económico y social es creciente ($\Delta S \geq 0$). El análisis se toma en dos puntos del tiempo, el actual t_0 y el futuro t_{+i} , donde i es referencia del periodo futuro. En primer lugar, el nivel actual de energía precede de la disponibilidad material de procesos productivos anteriores. El sistema económico demanda insumos ambientales (baja entropía) y los transforma en residuos y degradación ambiental (alta entropía). Esta nueva manifestación de la materia modifica los niveles energéticos y materiales del sistema ecológico, provocando que las manifestaciones climáticas sean más extremas.

En este análisis, la naturaleza del cambio climático es endógena al proceso económico en lugar de considerarse una externalidad como en la economía tradicional. La alteración de los ciclos naturales, el nivel alto de residuos y la transformación de baja en alta entropía produce que la calidad de la energía y materia disminuya en la triada de sistemas económico-ecológico-social. Como resultado, el nivel de entropía incrementa. Para el siguiente periodo productivo, t_{+i} , la entropía del sistema pasa de $\Delta S \geq 0$ pasa a $\Delta S' \geq 0$ (donde $S' \geq S$). Esta condición limita los medios disponibles para el siguiente proceso productivo.

En términos cualitativos, el sistema ecológico se manifiesta en situaciones apremiantes a la población a causa de las múltiples manifestaciones del cambio climático y crisis ecológica. La creciente entropía puede considerarse como un indicador de conflicto ambiental en el espacio social mientras en el espacio económico manifiesta la irreversibilidad de los procesos, la dificultad para la esfera productiva para generar mercancías y el desperdicio que generan de materiales. Desde la perspectiva macro, el papel de la entropía se convierte en el escenario de referencia para el conjunto de interacciones. Es el punto clave del espacio donde las acciones tienen lugar y condiciona el conjunto de respuestas tanto a nivel individual,

empresarial e institucional.

2.2.7.2. Internalización simultánea meso-micro

El nivel macro muestra la irreversibilidad energética de cualquier acción deliberada dentro del sistema económico. De tal manera que cada proceso productivo implica la disminución de calidad y cantidad de la energía y materia disponible en el sistema y el nivel de entropía incrementa. Ambas esferas - meso y micro- van a retroalimentar la integración del problema ecológico.

Primeramente, el problema ecológico para el ser humano es un reto a nivel cognitivo. De acuerdo con los psicólogos y neurocientíficos Sörqvist y Langeborg (2019) los mecanismos transmisores (arquocortex) no han evolucionado para percibir las manifestaciones del cambio climático como una amenaza²⁹. Entonces, ya conociendo la estructura cerebral del HSOE, se sabe que el único camino restante para integrar el problema ecológico en el conjunto de reglas individuales es el neocortex. Efectivamente, al estar asociado a nuevas habilidades cognitivas y al adaptarse como resultado de la interacción social, es necesario establecer mecanismos para incidir sobre esta parte del cerebro y producir, de manera artificial, debido a que no es un resultado de la evolución biológica, la preocupación de la entropía creciente. Es aquí donde el nivel meso produce este fenómeno deseable.

En efecto, el nivel meso se define como el espacio donde se realiza la coordinación de las reglas e instituciones, además explica la relación de los agentes con el conjunto de instituciones (Dopfer y Potts, 2009). Este espacio contiene el paradigma tecnológico vigente, las reglas del juego de los mercados, el marco legal, regulatorio, las empresas, la organización de las instituciones públicas y las características culturales de cada región.

Dicha dimensión, de acuerdo con Dopfer (2012), se genera la actualización de las reglas e instituciones, dando como resultado una meso trayectoria donde se actualizan,

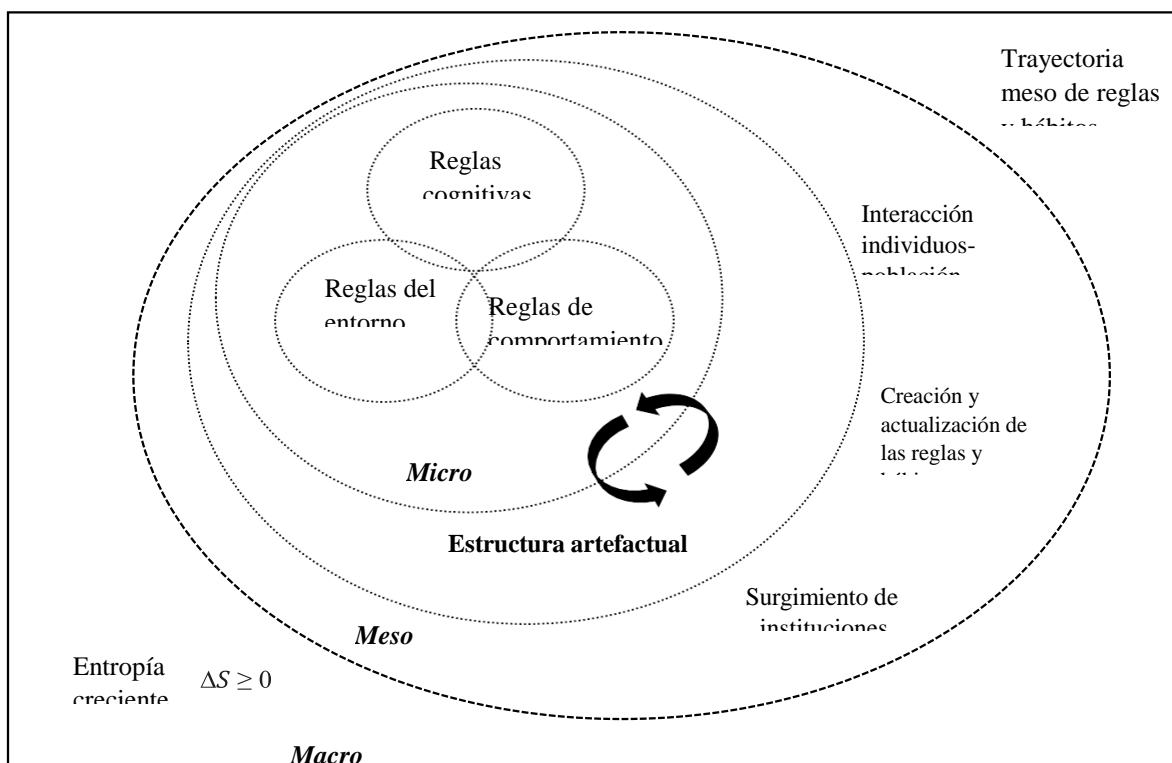
²⁹ Siguiendo con este estudio, los autores señalan que, a diferencia del fuego, el cerebro humano carece de los receptores para sentir peligro respecto a un fenómeno invisible como resulta cualquier manifestación del cambio climático. Por lo cual, la mayoría de las personas realizan acciones “buenas” hacia la naturaleza bajo un criterio ético-moral más no en términos energéticos. Las “acciones de compensación” caracteriza, siguiendo a los autores, la mayoría acciones de consumo. En otras palabras, las personas experimentan una sensación de responsabilidad al adquirir, por ejemplo, un producto “eco- friendly” pero no se da cuenta que su consumo, en términos energéticos, implica presiones sobre el recurso natural que se utiliza como materia prima.

adoptan y retienen los cambios. De manera sincrónica el nivel meso influye sobre los cambios a nivel micro y refleja la trayectoria de cambio de las reglas e instituciones a nivel agregado.

La forma en que influye el contexto institucional sobre las reglas e instituciones es a través de la información que posee la estructura artefactual. En consecuencia, las instituciones tienen la capacidad de influir sobre la consideración del medio ambiente que tienen los individuos.

En efecto, Ostrom (1990, 2005) señala que el abuso de la conducta humana y el proceso económico se debe principalmente a la falta de comunicación entre las instituciones. Por tanto, la gobernanza de los recursos naturales requiere de crear instituciones de abajo hacia arriba desde la acción de agentes organizados para el cambio de las reglas con el fin de solidificar una trayectoria meso que disminuya los riesgos asociados al cambio climático o permita una mejor eficiencia en el uso de bienes naturales.

Figura 2.10 Interacción micro-meso-macro



Fuente: Elaboración propia

De lo anterior se deriva un punto importante. El primer espacio de contacto de la entropía en el campo meso son las instituciones. Ahora, las instituciones son claves para influir sobre el conjunto de creencias y reglas normalizadas en la sociedad al tiempo que reconoce los límites de cambio debido a la dependencia de la trayectoria. Toda modificación influye a nivel micro, nivel individual, sobre la estructura neocórtex. En este mismo nivel, el aparato gubernamental³⁰ busca incentivar el cambio de conciencia rompiendo así con el sesgo cognitivo que tiene el ser humano para comprender los problemas asociados al cambio climático³¹.

2.2.7.3 El Estado como actor relevante para internalizar el problema ecológico

Un actor relevante para la actualización de las reglas y rutinas es el Estado. Al ser parte de la estructura artefactual, tiene el potencial para incidir sobre las interrelaciones de los actores. En la actualidad, se considera al Estado como el principal convocante, en primer lugar, del problema climático y, en segundo lugar, las medidas hacia la mitigación.

El espacio meso se integra por aspectos legales, sociales, políticos, además de incluir las formas organizativas encargadas de las regulaciones, la interacción y evolución de los grupos sociales (Matkovskyy, 2012). Así, frente a las variaciones de la entropía en la esfera macro, el gobierno puede utilizar distintos mecanismos para transmitir a los agentes el problema medioambiental. Como ya se apuntó previamente, la barrera cognitiva del ser humano para incorporar los problemas ambientales a su conjunto de reglas, deben existir mecanismos externos que produzcan el mensaje. Por otra parte, la interacción entre actores

³⁰ En efecto, el establecimiento de una función objetivo en el sistema orientado hacia la transición energética para disminuir el impacto entrópico requiere de una participación de las instituciones gubernamentales. Es importante resaltar que la creación de nuevas reglas y rutinas depende de la información al alcance del HSE. A medida que el mismo gobierno intervenga con medidas de reducción de emisiones, establezca un plan nacional de descarbonización, campañas de concientización en los medios públicos, etcétera, impulsará la internalización de la problemática ecológica.

³¹ Los límites cognitivos son factores relevantes para la internalización de los problemas ambientales y que no se han tomado en cuenta adecuadamente. En efecto, Grothmann y Patt (2005) señala que la falta de percepción del riesgo es el primer factor. Norgaard (2009) atribuye este riesgo a 4 factores. i) la gente no sabe lo suficiente para darse cuenta del peligro, ii) las personas no les importa lo suficiente como para actuar, iii) hay una jerarquía de necesidades y clima el cambio no es una necesidad inmediata, iv) la gente tiene confianza en que el gobierno

permite amplificar y crear una dinámica particular para integrar el problema de creciente entropía en el espacio macro.

La capacidad del HSCE para internalizar la problemática ecológica depende en gran medida de la capacidad institucional y gubernamental para reconocer los efectos adversos de las variaciones climáticas, generar los mensajes apropiados con la finalidad de crear conciencia entre los actores, construir las alianzas a nivel institucional y favorecer la difusión dentro de la estructura artefactual. En el caso del funcionamiento de los mercados vinculados al crecimiento de la entropía, el Estado puede convertirse en regulador de las actividades contaminantes y promoción de fuentes limpias.

2.2.7.4 Incidencia de los actores sobre la evolución, cambio, adaptación institucional y creación endógena de respuestas

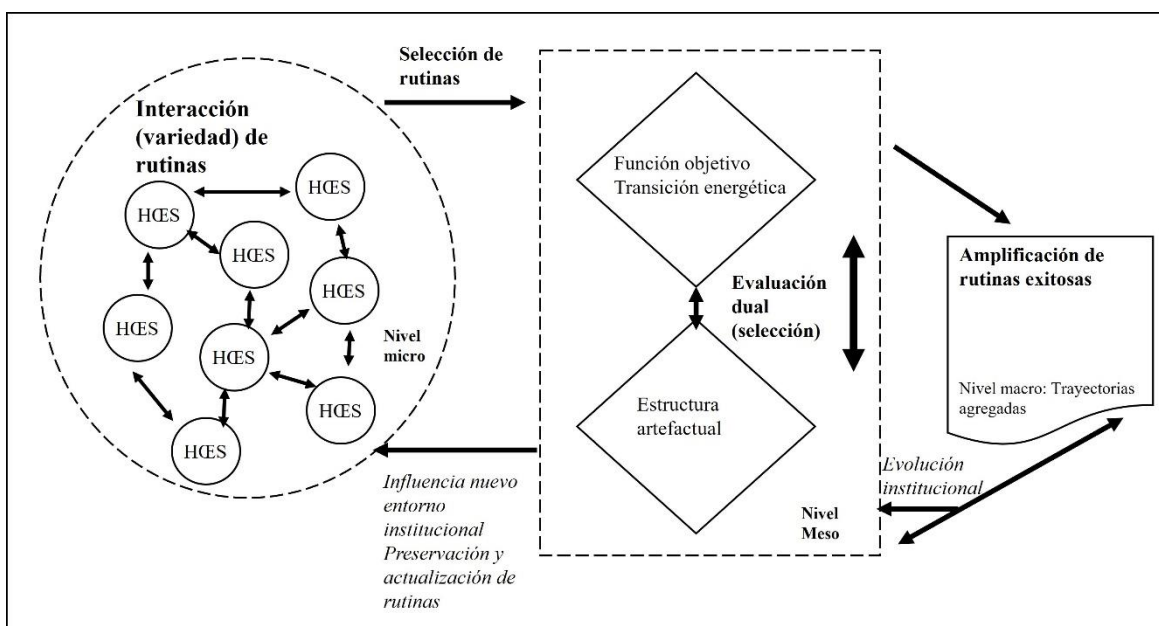
Ante la preocupación y conciencia del problema ambiental, es necesario explicar la reacción de los actores. Un mecanismo relevante para entender la actualización de reglas, rutinas e instituciones además de representar el pilar más importante de la economía evolutiva es el mecanismo evolutivo de selección natural.

Vromen (2011) señala la influencia de Darwin en la creación del mecanismo evolutivo. Por tanto, el rasgo dinámico de las sociedades es en gran medida a la evolución. El mismo autor señala que el principio evolutivo no se trata de la especie más fuerte sino de aquella unidad que logra reproducir sus características por más tiempo. El mecanismo evolutivo inicia con la variedad, después selecciona (adapta) y finalmente replica (Beinhocker, 2011).

Ante el cambio climático, la interacción, la influencia de las reglas e instituciones en los individuos da como resultado la determinación de la función objetivo. El incremento de la entropía orienta la respuesta hacia la modificación de los patrones de consumo y producción. De tal forma, las rutinas variadas de n -actores se someten al principio evolutivo. La variedad de rutinas para reducir el daño ambiental de las acciones humanas y económicas pasan por un proceso de selección. El criterio bajo el cual se selecciona es la situación de la estructura artefactual y el vínculo con la función objetivo. Si la estructura artefactual tiene la capacidad para replicar la rutina adecuada y además se vincula con la función objetivo (transición

energética), entonces, las rutinas coherentes con ambos criterios pasan a la parte final, la replicación.

Figura 2.11. Respuestas endógenas, selección de rutinas y cambio institucional



Fuente: Elaboración propia

Interpretación: El problema ambiental internalizado en el HCES genera una variedad de rutinas a fin de modificar las prácticas productivas y sociales. Posteriormente, las rutinas seleccionadas se evalúan respecto a la función objetivo (transición energética) y la capacidad de la estructura artefactual para reproducirlas. Si cumple con ambos, el espacio meso amplifica las rutinas. A nivel macro, las rutinas exitosas se visualizan como trayectorias agregadas. Finalmente, el nuevo entorno institucional refuerza las rutinas a nivel micro y se actualizan constantemente (gracias a las capacidades cognitivas, tipos de reglas e interacción del HCES).

De esta manera, las rutinas exitosas bajo el criterio artefactual y la función objetivo de reducir el daño ambiental se traslada al nivel institucional. Gracias a los receptores cognitivos del HCES y las reglas sociales, internalizan las nuevas rutinas e impulsan, de forma endógena, el cambio institucional. Gráficamente se observa la figura 2.11.

2.2.7.5 Proceso de adquisición de conocimiento de las empresas y creación de tecnologías físicas

Un factor clave para el cambio de reglas, rutinas e instituciones son las empresas. Desde una perspectiva evolutiva, las empresas son un complejo organizacional y tecnológico, donde la noción de organizacional está asociada con actividades humanas definidas como un conjunto

de rutinas que colectivamente constituyen la base de conocimiento (Metcalf, 1994).

Las empresas, como estructuras organizativas, se desenvuelven en un entorno de incertidumbre. Debido a la crisis ambiental, el entorno integrado de instituciones y legislación obligan al sector productivo a replantear sus prácticas a fin de reducir su impacto ecológico. Por tanto, las empresas se enfrentan al reto de modificar su estructura interna, mantener sus ganancias y conservar su posición en el mercado.

Al interior, las empresas están constituidas por rutinas productivas que les permite preservar su conocimiento científico y aprendizaje de mercado. A diferencia de las empresas neoclásicas, cada empresa posee una técnica de producción particular definida como una entidad abstracta que posee todo el conocimiento de los recursos, procesos, técnicas, herramientas y equipos, incluidas las habilidades y la experiencia del equipo de producción de la empresa, que están disponibles para realizar el trabajo de producción de cualquiera de los bienes que la técnica es capaz de producir (Shiozawa *et al.* 2019).

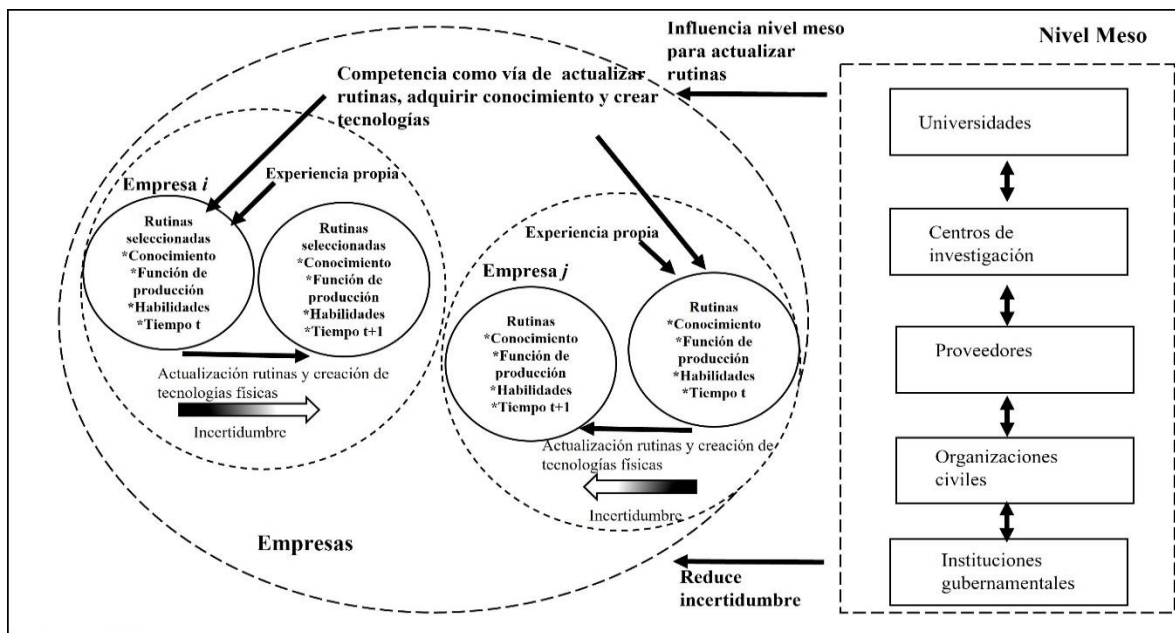
Ante la exigencia a nivel meso para modificar sus rutinas productivas, las empresas deben actualizar sus rutinas. Para ello, requieren revolucionar sus técnicas productivas a partir de la adquisición de nuevo conocimiento. De acuerdo con Dosi *et al.* (2002), el conocimiento es el mecanismo más importante del entorno evolutivo. Así, la forma organizacional de las empresas permite reaccionar frente a nuevos entornos gracias a la respuesta adaptativa o creativa (Antonelli y Ferraris, 2018a).

Siguiendo a los autores previamente citados, las empresas tienen 3 mecanismos para apropiarse del conocimiento: a) aprender de su propia experiencia, b) aprender de sus competidores, c) resolviendo nuevos problemas. En este punto, además de la capacidad de reacción de las empresas al interior para procesar y adquirir nuevo conocimiento acorde a la función objetivo social, el entorno juega un papel clave.

En efecto, siguiendo a Antonelli y Ferraris (2018b) y Catanni y Malerba (2021) y la interacción de instituciones, conexión regional con otras empresas, interacción con universidades, competidores, interacción con otras empresas (competidores, usuarios, proveedores, etc.) y otras instituciones como las universidades y organizaciones de la sociedad

civil impulsan la invención creativa. Concretamente, a medida que las empresas tengan: i) capacidades cognitivas al interior fuerte para crear nuevas rutinas y absorber el conocimiento; ii) entorno meso que facilite la difusión del conocimiento entre empresas competidoras, gobierno, universidades y otras instituciones, permitirán a las empresas adquirir conocimiento, reducir la incertidumbre e impulsar nuevas tecnologías físicas y sociales. Estas dinámicas pueden visualizarse en la figura 2.12

Figura 2.12. Adquisición de conocimiento de las empresas, actualización de rutinas y creación de tecnologías físicas



Fuente: Elaboración propia

Interpretación: Las empresas juegan un rol relevante en el cumplimiento de la función objetivo (transición energética). Las empresas están constituidas de conocimiento, habilidades, función de producción y rutinas productivas. Para preservar su posición, es importante la actualización de sus rutinas, para lo cual, el conocimiento es relevante. A nivel interno, la experiencia propia es una fuente, la segunda vía es la competencia y la tercer es el entorno meso. En un nivel de incertidumbre alto (parte negra de la flecha) en el tiempo t debido a la exigencia social de cambiar rápidamente sus rutinas, las empresas dependen fuertemente del entorno meso para transitar rápidamente en la creación de nuevas tecnologías físicas, además de poseer las capacidades cognitivas al interior. La actualización de rutinas reduce la incertidumbre (parte blanca de la flecha) en el periodo t+1

2.2.7.6. El mecanismo evolutivo en las tecnologías físicas y sociales

Como se apuntó, uno de los elementos de la estructura artefactual con lo que cuenta toda sociedad son las tecnologías físicas y sociales. Para explicar de manera endógena la respuesta frente al cambio climático, se recurre a estos elementos como puntos claves del proceso.

Considerando que el sistema en su conjunto utiliza la estructura artefactual para incidir sobre la conciencia de los individuos acerca de su relación con el medio ambiente, la reacción natural es utilizar el conocimiento social para buscar respuestas a los niveles de entropía creciente. Para ello, se requiere modificar las pautas de producción del conjunto de empresas, reconociendo que el sistema económico es un subsistema del conjunto general.

El papel principal reside en las acciones de las empresas. Metcalfe (1994) las define como una institución creativa que utiliza una serie de hábitos y rutinas de producción. Beinhocker (2006, 2012), desde una perspectiva entrópica, las considera como es una persona, o un grupo organizado de personas, que transforma materia, energía e información de un estado a otro con el objetivo de generar ganancias, mientras Davidson y Potts (2016) las consideran como instituciones que reducen los costos sociales de la producción e incrementa la eficiencia en la asignación y uso de recursos.

Debido a la dependencia de la trayectoria, antes de ser conscientes del problema ecológico, las empresas suelen basar sus procesos productivos bajo una lógica de maximización de beneficios sin importar las presiones ecológicas que implica la producción de mercancías. De tal forma, la configuración meso está constituida por instituciones que no tienen en sus criterios el cuidado del ambiente ni toman en consideración la entropía a nivel macro. Entonces, al tener presente el problema entrópico, las instituciones nuevas buscan modificar el marco de hábitos y rutinas productivas. La clave recae sobre las tecnologías vigentes.

El término de tecnologías físicas y sociales se deriva del trabajo de Nelson y Winter (1982) y Nelson (2003, 2005), definiéndose las primeras como métodos y diseños para transformar materia, energía e información de un estado a otro en busca de un meta objetivo. Éstas se encuentran bajo un conocimiento codificado y son resultado del refinamiento del conocimiento tecnológico. Por otra parte, las tecnologías sociales son susceptibles a considerarse como instituciones debido a que son los métodos y diseños para organizar a las

personas en la búsqueda de una meta. Son las formas de organización y el conjunto de reglas e instituciones que definen las reglas del juego.

El papel de la entropía produce que el conjunto de tecnologías evolucione a través de cambios en las reglas y formas organizativas hacia la búsqueda de reducir el nivel entrópico de la producción. Como se hizo mención, el proceso evolutivo de la economía se reconocía sobre la estructura cognitiva de los individuos. Sin embargo, no se limita a esa esfera. De acuerdo con Beinhocker (2012) el proceso evolutivo puede pensarse como un dispositivo que opera sobre el conjunto de tecnologías, rescatando así el espíritu schumpeteriano. Teniendo en cuenta esto, la economía es un conjunto coevolutivo de instituciones, tanto de la tecnología, las reglas de comportamiento y la estructura artefactual en su conjunto.

Para Beinhocker (2012) el proceso de evolución funciona como un algoritmo que tiene el potencial de seleccionar, replicar y amplificar las tecnologías adecuadas para cumplir la función objetivo. Por meta del sistema se plantea reducir los daños causados del problema ecológico a causa del proceso productivo, reconociendo al sistema económico un subsistema del sistema natural teniendo en cuenta que la disminución del deterioro ambiental reduce los niveles de entropía y así puede garantizarse la vida en el planeta. La búsqueda evolutiva de las tecnologías para cumplir con este fin crea un orden. Las condiciones que requiere el algoritmo para operar son las siguientes:

- Es necesario que las tecnologías físicas y sociales tengan la posibilidad de renovarse a fin de tener nuevos diseños.
- Contar con instituciones o reglas que preserven los nuevos diseños.
- Existir los agentes capaces de entender el conocimiento codificado.
- Los agentes y/o empresas que interactúan en la búsqueda de nuevos diseños son capaces de crear nuevos nichos productivos para preservar y replicar las nuevas reglas.
- La posibilidad de que el nuevo esquema de tecnologías se modifique en el tiempo
- De acuerdo con la función objetivo, los agentes menos aptos para cumplirla son reemplazados.

La combinación de tecnologías opera de forma recursiva. Es decir, los procesos recurren a su mismo para futuras adecuaciones³²

Considerando estos puntos, la estructura artefactual es objeto al criterio evolutivo ya sea en el conjunto de reglas y hábitos de comportamientos culturales y sociales, al mismo tiempo que selecciona y amplifica el conjunto de técnicas productivas que permite la realización de la función objetivo. Partiendo de una estructura institucional heredada por la dependencia de la trayectoria, la evolución del sistema selecciona solo aquellos elementos tecnológicos que sean útiles para construir una nueva trayectoria productiva a nivel meso descartando aquellas rutinas de producción basadas en alto consumo energético y generadores de altos niveles entrópicos. En conjunto, las nuevas instituciones sociales y hábitos productivos son clave en la evolución sostenida del sistema considerando los límites naturales del planeta.

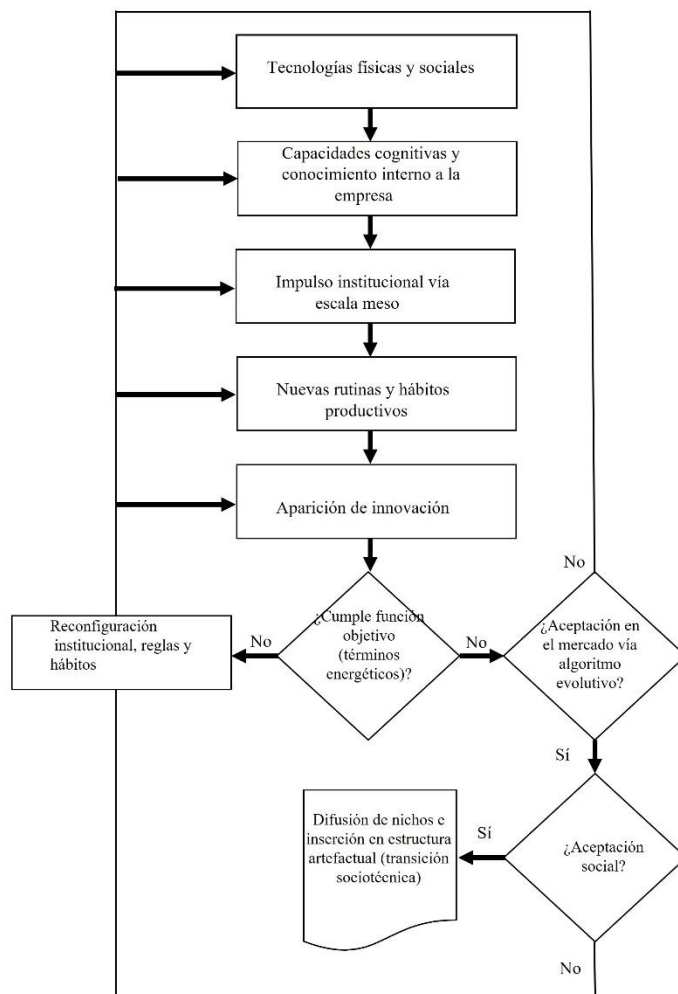
2.2.7.7 Innovación y difusión tecnológica como resultado endógeno emergente sujeto al desempeño energético y aceptación social; desarrollo de nichos y transformación del paradigma sociotécnico

Con los elementos descritos hasta el momento, las empresas emprenden la búsqueda de rutinas novedosas para lograr la transformación productivas motivados por la dinámica interna y el impulso en la esfera meso. De nueva cuenta, el mecanismo evolutivo opera en las rutinas productivas. En este punto, como se señaló en el punto previo, el proceso evolutivo funciona como un algoritmo tiene el potencial de seleccionar, replicar y amplificar las rutinas, tecnologías físicas y sociales adecuadas para lograr la transición, el resultado emergente de dichas acciones es la innovación.

La figura 2.13 representa la búsqueda de rutinas por parte de las empresas opera bajo el principio evolutivo tanto a nivel interno y escala meso. Lo relevante radica en las tres evaluaciones. La primera es el mercado como elemento seleccionador de las empresas en el mercado, aquellas empresas con rutinas compatibles con la función objetivo permanecerán en el mercado y el resto tendrá que reconfigurar.

³² Por algoritmo se entiende como una función estructurada que permite la realización de un objetivo a partir de las etapas e instrucciones contenidas en él.

Figura 2.13. Algoritmo evolutivo: innovación, nichos y transición energética



La segunda validación es la aceptación social. De acuerdo con Upham *et al.* (2019), en una transición los niveles de aceptación son los siguientes: (a) aceptación pública, en el sentido de consumidores individuales y ciudadanos; (b) aceptación de las partes interesadas, en el sentido de organizaciones sin objetivos políticos formales, pero con interés en el resultado; y (c) aceptación política, en el sentido de apoyo a las políticas por parte de los niveles gubernamentales, agencias y partidos políticos. Finalmente, en caso de superar el conjunto de evaluación, el entorno meso se encarga de difundir las rutinas que permitan la transición energética basada en estos nichos. En su conjunto, el nivel meso y la dinámica

interna de las empresas sujeto a la evaluación energética, social y de mercado constituyen la transición sociotécnica.

2.2.8 De la innovación endógena a la transición energética

Hasta el momento se cuenta con los elementos clave para explicar el proceso de innovación endógena en un sistema evolutivo con la integración del enfoque biofísico de la entropía. A nivel micro, las empresas definen como función objetivo el éxito de sus procesos productivos si logran aceptación social, mercado y energética, es decir, entrópica. A través del algoritmo se depuran el conjunto de respuestas existentes y sólo se consideran las acciones que se vinculan con la función objetivo. Es decir, se respeta la naturaleza de SCA donde no todas las acciones ni dinámicas son relevantes.

Sin embargo, a pesar de la dinámica evolutiva del sistema, a partir de la variedad, selección y replicación, es importante indagar de manera más detallada la forma en que la respuesta creativa de innovación, a pesar del proceso de validación de mercado, social y energética, se prolifera en el sistema y transforma el régimen existente. Dicho con otras palabras, la manera en que la innovación endógena se impulsa a través del espacio micro-meso-macro para validarse en el mercado, social y entrópica; en su conjunto, transición sociotécnica.

Para ello, se realiza un breve recuento de modelos analiza las principales propuestas teóricas respecto al proceso sistemática de la transición, centrando el interés particular sobre el Modelo Multinivel propuesto por Geels (2002a, 2002b, 2019). A partir de sus bases teóricas, se intenta superar sus críticas a partir de los puntos previos presentados, proveyendo una base microfundamentada de sus mecanismos endógenos y aportando en su conjunto lo que denomino el Modelo Multinivel Bioevolutivo, Esta propuesta permite construir un modelo sólido para entender los mecanismos de la transición sociotécnica desde sus bases micro hasta su proyección en el nivel meso.

2.2.8.1 Algunos modelos para analizar la transición

Se han desarrollado distintos modelos para caracterizar la dinámica de transición hacia el uso de energías renovables. Desde la economía neoclásica se enfatiza en el papel de la política de innovación priorizando el espacio macroeconómico. El trabajo pionero es la contribución de

Robert Solow (1956) quien apropia al cambio tecnológico la posibilidad de incrementar la productividad, al tiempo que explica el crecimiento económico más allá del capital y el trabajo.

A raíz de esta base teórica, economistas franceses y estadounidense (Romer, 1986, 1994; Aghion y Howitt, 1998) construyeron las bases microeconómicas dentro del mismo marco analítico neoclásico para explicar, de manera endógena, el cambio tecnológico. A partir de este avance en la teoría del crecimiento económico, el estudio de los determinantes para explicar el proceso de apropiación y desarrollo de tecnologías renovables desarrolló una taxonomía particular.

De acuerdo con Conchado (2017), la transición energética se centra principalmente en la dinámica de la política de innovación fundamentado teóricamente en los aportes neoclásicos del cambio tecnológico exógeno y endógeno. De forma operativa, se hace uso principalmente de análisis econométricos que usan como variables dependientes el número patentes en innovaciones verdes, publicaciones, gasto en innovación y desarrollo (I+D), reducción de costos asociados a la instalación de plantas renovables, capacidad instalada, valor agregado, entre otras. Respecto a las variables dependientes predomina el ahorro de energía en los hogares e industrias, productividad, creación de empleos gracias a la difusión de nuevas tecnologías renovables, reducción de las ECO2 y crecimiento económico.

Frente a los límites del análisis estadístico y macroeconómico del cambio tecnológico, comenzó el estudio de la dinámica de la innovación desde una perspectiva sistemática conocidos como Sistemas de Innovación. En este grupo de modelos, Moallemi *et al.* (2016) destaca la importancia del contexto espacial como los aportes de Freeman (1995) y Nelson (1988) con los Sistemas Nacionales de Innovación, que dieron pauta a Cooke *et al.* (1997) para hablar de los Sistemas Regionales de Innovación y a Malerba (2004) proponer los Sistemas Sectoriales de Innovación. En la misma sintonía, Carlsson y Stankiewicz (1991) propusieron los Sistemas de Innovación Tecnológica, mientras Crepon Duguet y Mairesse (1998) analizan el esfuerzo de innovación sistemática a través del modelo CDM.

Este conjunto de modelos tiene como idea general estudiar la dinámica sistemática de las empresas, Estado y otros actores bajo un contexto institucional, jurídico y tecnológico

determinado para impulsar la generación, difusión y utilización de innovaciones tecnológicas. Gracias a estos aportes, el campo de las transiciones se nutrió en el diseño y configuración de modelos que dieran cuenta de los factores que obstaculizan o impulsan la adquisición de tecnologías renovables.

Considerando los aportes de Ulli-Beer (2013) y Moallemi *et al.* (2019, 2020), se analiza de manera general los modelos que dentro de la literatura destacan en el análisis de las transiciones económicas desde una perspectiva sistemática. El modelo de gestión de la transición (Transition Management Model), el enfoque multipatrón (Multi-Pattern Approach) y el sistema de innovación tecnológica (Technological Innovation Systems), son los modelos retomados.

2.2.8.2 Modelo de Gestión de la Transición (Transition Management Model)

La discusión acerca de la salud de los ecosistemas derivó en el desarrollo de metodologías que fueran más allá de establecer metas y objetivos acerca del nivel de emisiones. Entre las pioneras destaca los modelos de gestión de la transición donde se propone, desde una perspectiva mucha más cualitativa, como punto medular el cambio sociotécnico y la transformación de los sistemas energéticos en el largo plazo haciendo uso principalmente de la gobernanza.

De acuerdo con Kemo *et al.* (2007) la gestión de la transición es un modelo de gobernanza de varios niveles que da forma a los procesos de coevolución utilizando visiones, experimentos de transición y ciclos de aprendizaje y adaptación. Es decir, el punto de arranque es considerar que los patrones de consumo de la sociedad y la forma intensiva de la producción son problemas arraigados y que difícilmente lograrán subsistir debido al gran impacto ambiental que generan, por consecuencia, se requiere transformaciones de las prácticas que generan los problemas en lugar de sólo remitirse a las consecuencias adversas, como puede ser una política combativa contra las emisiones contaminantes.

Este enfoque considera el proceso de transición energética como un conjunto de cambios simultáneos en las estructuras de cada subsistema que depende del sistema ambiental. Por ello, como aporte de la economía evolutiva, es posible hablar del proceso de selección, amplificación y difusión de las mejores prácticas, siendo una analogía biológica de

los procesos sociales.

En este proceso evolutivo la gobernanza es el vehículo que dirige la gestión del cambio energético. Meadowcroft (2009a,b) apunta que desde la perspectiva de la gobernanza del desarrollo sustentable la gestión de la transición permite: i) adaptar plazos de largo alcance para la exploración de alternativas para la innovación del sistema. ii) cambiar las prácticas económicas y sociales preestablecidas y que resultan de gran impacto ambiental. iii) generar redes donde los actores implicados puedan desarrollar innovación tecnológica y social para un camino sustentable y iv) fomentar una diversidad de innovaciones para satisfacer las necesidades de la sociedad y al mismo tiempo cuidar el ambiente.

A pesar de la crítica a las formas insostenibles de la producción y de la vida misma, este enfoque no representa un cambio sustantivo o reformador del esquema de generación de mercancías. Wittmayer et al. (2018) establece que la trayectoria de largo plazo propuesta por la gestión de la transición no tiene el objetivo de reemplazar los procesos actuales sino plantear una estrategia coordinada. Entre los puntos más destacables están: 1) planificación y creación de herramientas para incidir en la trayectoria a futuro. 2) Transformar las políticas institucionales vigentes. 3) Planificación de mediano y largo plazo. 4) Incidir en la transformación de las prácticas sociales y de producción a través de la innovación.

Siguiendo a los mismos autores, la agenda de gobernanza debe seguir los siguientes pasos.

- Contar con la percepción adecuada del sistema y sus problemas.
- Considerar una transformación de largo plazo. Es decir, al menos 25 años para ver reflejado los cambios.
- Tener en cuenta que los objetivos son flexibles debido a la dinámica de constante cambio en la sociedad.
- Sobre el tiempo, la gestión de la transición debe considerar proyectos cuya naturaleza es lenta y otros donde los cambios son acelerados.
- No existen elementos externos al sistema, debe integrarse la complejidad económica y social en su conjunto.
- La economía y sociedad deben aprovechar tanto las situaciones de equilibrio y

desequilibrio como situaciones óptimas para el cambio. En otras palabras, cualquier momento es adecuado para la transformación.

- A pesar del régimen tecnológico vigente, se considera relevante el impulso de nichos donde los actores puedan innovar.
- Identificar a los actores de cambio para dotarles de posibilidades a sus acciones creativas.
- Relevancia de la participación conjunta para el apoyo de políticas de transición. En específico, crear, modificar, desechar y reconfigurar medidas de cambio.

A pesar de su dimensión holística y planificación integral, este enfoque ha sido severamente criticado por su visión armónica del proceso de gestión. Entre las controversias más destacadas está el trabajo de Shove y Walker (2007) quienes señalan que el proceso de gobernanza sobre el cual descansa la gestión sistemática existe la idea de un super formulador de política quien tiene la capacidad de comprender la complejidad de todas (o la mayoría) de interacciones, nichos de innovación y creadores de capacidades tecnológicas. Por lo cual, el desarrollo de la estrategia se convierte en un proceso autoalimentado y automático donde existen una supervisión expresa de todos los cambios. Finalmente, esta perspectiva deja de lado detalles clave como el diseño de instituciones para la gestión autogobernada, frecuencia y escala de supervisión, entre otros elementos.

2.2.8.3 Enfoque multipatrón (Multi-Pattern Approach)

Este modelo representa uno de los avances más recientes en la literatura de las transiciones energéticas. El enfoque fue presentado por primera vez por Fjalar J. de Haan (2010). A diferencia de los esquemas de transición donde se asume el entorno meso como espectro relevante en las decisiones de los actores, esta metodología va más allá y se interesa en explorar las razones en la cual los sistemas cambian en lugar de asumir que cambian instantáneamente o suponer un proceso evolutivo automático

La situación inicial es considerar las necesidades de la sociedad frente al problema ambiental. Como respuesta se crean constelaciones y el objetivo es mapear las complejas relaciones establecidas en el marco de la transición. De Haan (2010) y Rauch *et al.* (2017)

plantean, en primer lugar, identificar los límites y alcances del sistema analizado bajo tres criterios: función, tiempo y espacio. De esta forma se tendrá en cuenta las necesidades sociales que debe cubrir ese sistema. La autora es clara al señalar que cada sistema debe estar bien definido por lo cual, el sistema energético debe satisfacer necesidades sociales exclusivamente energéticas.

El segundo paso es identificar las soluciones que aparecen respecto al problema inicial. Cada solución interactúa con el resto y requiere de instituciones que las hagan valer sistemáticamente. El conjunto de soluciones, las constelaciones, deben clasificarse de acuerdo con su grado de éxito debido a que no todas generan el mismo resultado. Habrá constelaciones que no resuelvan el problema inicial. Posteriormente, a diferencia de la mayoría de los modelos de transición, en lugar de asumir una relación causal positiva entre las constelaciones y las necesidades sociales, la autora plantea que deben examinarse de manera detallada las condiciones en que cada solución tiene efectividad.

De esta manera, examinar cada constelación permite identificar el número de necesidades resueltas a partir de las restricciones de las mismas propuestas. Frente a las limitaciones que obstaculizan o restringen la solución, existe un nicho de oportunidad para la aparición de respuestas innovadoras.

Con este algoritmo de identificación de necesidades satisfechas es posible identificar patrones de soluciones exitosas. De Haan *et al.* (2016), De Haan y Rotmans (2018) identifican tres patrones en el proceso de transición energética:

1. *Patrón de adaptación:* Resultado del cambio en la constelación mediante el cambio de instituciones y aparición de nuevas.
2. *Patrón de empoderamiento:* Se refiere a las constelaciones que ganan preferencia a costa de otras. Por ejemplo, cuando alguna tecnología renovable se ofrece a un costo inferior gracias al desarrollo tecnológico creado en otro nicho distinto al suyo.
3. *Patrón de intervención:* Enfatiza en el papel de actores externos en el proceso de respuesta a las demandas sociales. Por ejemplo, la aparición de la industria extranjera en el desarrollo de tecnologías que cubren las necesidades locales o el papel de alguna institución gubernamental en la creación de tecnología exclusiva.

Finalmente, siguiendo a los autores, después de delimitar el sistema, analizar las constelaciones e identificar los patrones, es necesario analizar la dinámica del sistema. Para ello, cada constelación debe tener un plazo fijo de tiempo, las interacciones y condiciones del resto de constelaciones, el aislamiento de constelaciones diferentes, la posibilidad de seguir el mismo patrón que otras constelaciones y finalmente seguir la misma trayectoria estable de alguna constelación que siga el mismo patrón.

2.2.8.4 Sistema de Innovación Tecnológica (Technological Innovation Systems)

La idea sobre Sistemas de Innovación Tecnológica (SIT) fue desarrollada por Carlsson y Stankiewicz (1991) al referirse a la red de interacciones entre los actores involucrados en la generación, difusión y utilización de tecnologías. En conjunto, el proceso de innovación se desarrolla dentro de un entorno político, geográfico y tecnológico singular. De acuerdo con Al-Saleh (2010) existen tres niveles de análisis

- *Dimensión cognitiva:* Conjunto de tecnologías (es decir, espacio de diseño) que da como resultado un nuevo conjunto de posibilidades tecnológicas.
- *Dimensión organizacional e institucional:* Contiene el conjunto de interacciones de los actores encargados de la creación de tecnologías. En general las redes están integradas por empresas, universidades, actores del sector público y privado.
- *Dimensión económica.* Espacio donde los actores de la red potencian el conjunto de posibilidades tecnológicas existentes. El resultado de su comercialización impulsa el crecimiento económico.

El uso de esta metodología en el campo de las transiciones energéticas es con el fin de identificar los elementos clave en la difusión de energías renovables. Kanda et al. (2019) destacan 5 puntos clave para entender la influencia del SIT sobre la trayectoria ambiental.

1. Desarrollo y difusión del conocimiento: EL SIT establece la forma en que operan estos mecanismos.

2. Orientación de la búsqueda: Conjunto de actividades que influyen positivamente para la visibilidad y claridad de las necesidades específicas que los usuarios de la tecnología exigen.

3. Experimentación empresarial: Integra todas las actividades realizadas por el sector

empresarial con el fin de crear oportunidades de negocio a partir de la exploración de conocimientos e incrementar sus redes de interacción.

4. *Formación de mercado*: Actividades realizadas dentro de los mercados para generar nichos de mercado. Incluye los estímulos gubernamentales para el desarrollo de estos espacios.

5. *Externalidades positivas*: Captura las ventajas que logra el acceso de nuevos actores a la red de interacción

6. *Legitimación*: Percepción y grado de aceptabilidad social al nuevo desarrollo de instituciones para la difusión de tecnologías ambientales

7. *Utilización de recursos*: Integra la movilización de recursos financieros, esfuerzos humanos e institucionales para el buen funcionamiento del sistema de innovación.

Autores como Walrave y Raven (2016) complementan este esquema al señalar que la SIT puede tomar 4 vías de transición energética: i) Trayectoria de transformación. Hace alusión a un SIT con mínimas variaciones. Frente a la existencia de un paradigma fuertemente enraizado los actores únicamente intentan hacer innovaciones marginales. ii) Desalineación y realineación. Se refiere a un SIT fuertemente establecido, pero en el cual los actores pierden su confianza, por lo cual, buscan de manera activa ciertas alternativas. iii) Sustitución tecnológica. Representa el cambio de patrón tecnológico a causa de las acciones de actores innovadores. Aprovechando el impulso, el actual régimen continúa alentando el cambio constante. iv) Trayectoria de reconfiguración. El SIT se ha desarrollado plenamente y los costos del nuevo patrón de innovaciones es económico incrementando su difusión.

Este enfoque forma parte de los modelos asociados al Sistemas Nacionales de Innovación. El rasgo compartido es el análisis a nivel de interacciones para la difusión de interacciones entre los actores, sin embargo, el SIT se concentra en los actores que realizan la interacción y deja en segundo plano el enfoque sistemático. En efecto, autores como Bergek *et al.* (2005) reconoce la importancia dominante del innovador, aunque años después Bergek *et al.* (2015) demuestran el potencial de la metodología para integrar aspectos geográficos, políticos y regionales.

Para intentar suplir esta desventaja, autores como Markard y Truffer (2008) y Kanda *et al.* (2019) reconocen de suma importancia conjugar este esquema con el Modelo Multinivel

operatividad, además de resaltar la importancia de los nichos de innovación (es decir, los actores quienes realizan la difusión de tecnologías) permite comprender apropiadamente la importancia del marco institucional. En el siguiente apartado se expone esta metodología que forma parte central del análisis de la transición energética a nivel internacional.

2.2.8.5 Modelo Multinivel (Multilevel analysis)

El enfoque de las transiciones energéticas se ha visto influenciado fuertemente por dos marcos de referencia. El primero, el enfoque de la economía del conocimiento que argumenta la necesidad de estudiar los factores endógenos de los procesos de cambio energético (Geels *et al.* 2020). La segunda corriente dominante en la transición es la economía evolutiva, en particular trabajo neoschumpeterianos sobre regímenes, paradigmas y trayectorias tecnológicas (Dosi, 1982; Freeman y Pérez, 1988), la literatura sobre sistemas de innovación ambiental (Lundvall, 1992; Nelson, 1993) y el trabajo sobre coevolución (Norgaard, 1994; Nelson, 2001).

Ambos escenarios analíticos convergen para explicar el proceso de innovación y transición energética como un núcleo coevolutivo de las tecnologías físicas, sociales, reglas, hábitos, leyes e instituciones a largo plazo, contra las estimaciones econométricas tradicionales cuya periodicidad es corta o se remite a estimaciones de corte transversal.

Como resultado, emerge el modelo multinivel como herramienta empírica y analítica que organiza el análisis de las transiciones como un sistema sociotécnico que consiste en nichos (nivel micro), regímenes (nivel meso) y paisajes (nivel macro) (Kemp, 1994; Rip y Kemp, 1998; Geels, 2002, 2005; Geels y Schot, 2007; Smith y Stirling, 2010).

El punto de partida fue la noción de Nelson y Winter (1977) acerca de un régimen tecnológico que se refiere a las reglas cognitivas que guían las búsquedas individuales y a nivel de firmas para el desarrollo de innovaciones a lo largo de trayectorias tecnológicas específicas. Rip y Kemp (1998) y Geels (2002) ampliaron el concepto insistiendo en que los regímenes tecnológicos están integrados en instituciones e infraestructuras que dan forma a la trayectoria tecnológica. Geels (2002) reemplazó el término tecnológico por socio-tecnológico al considerar que ninguna transición es totalmente técnica. Más específicamente, Geels (2005)

sugiere que el régimen consta de tres dimensiones vinculadas: i) redes de actores y grupos sociales; ii) formales, normativas y reglas cognitivas que guían las actividades de los actores; (3) material y elementos técnicos (Verbong y Geels, 2007).

Los agentes se desenvuelven dentro de un marco de reglas formales (regulaciones institucionales, leyes, sistema legal), informales (aprendizaje de los actores cuando se relacionan con el resto), cognitivas (sistemas de creencias, agendas de problemas, principios rectores hacia la búsqueda de la innovación) y normativas (cumplimiento de las reglas de convivencia).

Asimismo, los regímenes sociotécnicos se sitúan en un paisaje o entorno determinado que contiene una serie de factores heterogéneos, por ejemplo, variaciones en los precios internacionales de energía, impacto de la política gubernamental, creencias, valores culturales y normativos que ejercen presión sobre el tránsito energético. De este nivel depende la velocidad del proceso de innovación.

El Análisis Multinivel se integra de tres espacios de interacción.

- El nicho es el espacio donde surgen las innovaciones (Geels, 2010). Dicha dimensión es donde se desarrollan las tecnologías renovables que, en un primer momento, coadyuvan con el régimen tecnológico vigente. La finalidad es que las tecnologías se desarrollen, maduren y posteriormente puedan amplificarse e integrarse al esquema de tecnologías disponibles
- El segundo espacio de interacción es el régimen. De acuerdo con Robertson (2019), es el lugar donde prevalece el esquema vigente de producción energética. Es decir, este espacio incorpora el marco político institucional que comprende las estructuras legales y normas institucionalizadas en una sociedad; marco económico tecnológico que incluye el desempeño económico, niveles tecnológicos y composición sectorial. Esta dimensión es fundamental al reafirmar el entorno institucional en la dinámica de transición. Los actores se desenvuelven dentro de un marco de reglas formales (regulaciones institucionales, leyes, sistema legal), informales (aprendizaje de los actores cuando se relacionan con el resto), cognitivas (sistemas de creencias, agendas

de problemas, principios rectores hacia la búsqueda de la innovación) y normativas (cumplimiento de las reglas de convivencia).

- El tercer espacio hace referencia al paisaje. Los regímenes sociotécnicos se sitúan en un paisaje o entorno determinado que contiene una serie de factores heterogéneos, por ejemplo, variaciones en los precios internacionales de energía, impacto de la política gubernamental, creencias, valores culturales y normativos que ejercen presión sobre el tránsito energético. De este nivel depende la velocidad del proceso de innovación. Estos factores desestabilizan o aceleran el proceso de transición (Robertson, 2019).

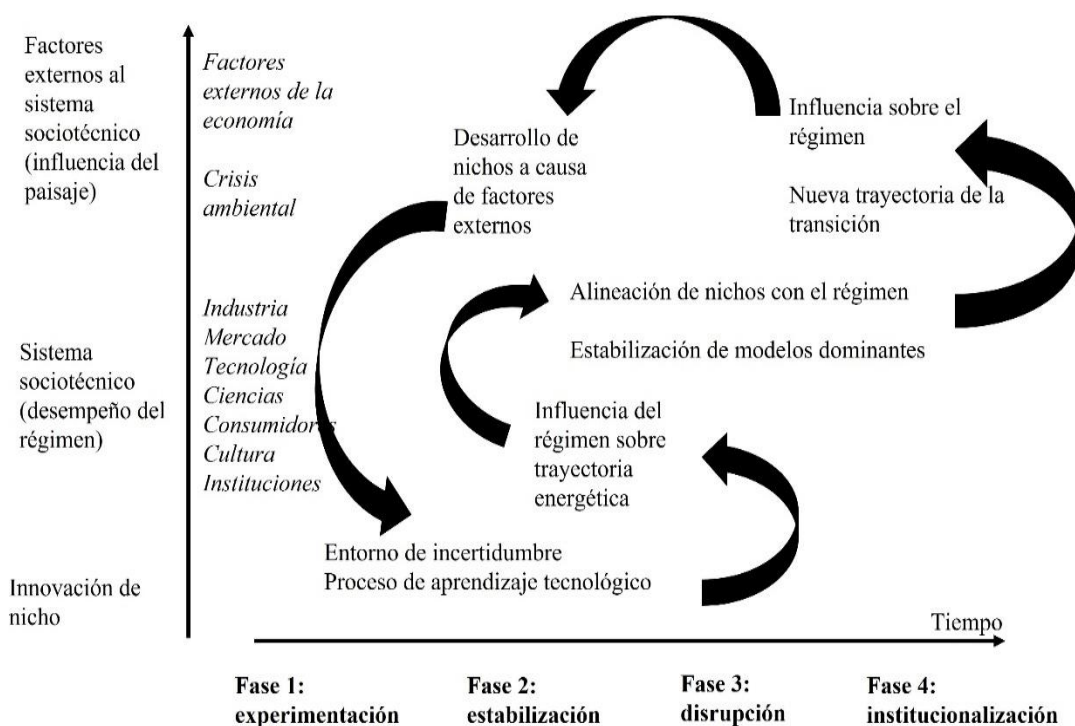
Es importante destacar que el aspecto que interesa examinar en esta visión multinivel es identificar los nichos de innovación que surgen durante un paradigma energético. La política de innovación va dirigida a impulsar nichos con los cuales, a través del análisis multinivel, puede comprenderse las características particulares como las redes de actores, la política de intervención, la difusión del conocimiento, entre otros. De acuerdo con Roberts y Geels (2019) la transición involucra 4 fases.

- Fase 1). Surgen innovaciones radicales en pequeños nichos al margen de los regímenes existente.
- Fase 2). La innovación se desarrolla en pequeños nichos de mercado que tuvieron acceso a recursos para un mayor desarrollo y especialización, permitiendo el surgimiento de un diseño dominante y la estabilización de reglas.
- Fase 3). Se caracteriza por una amplia difusión y competencia con el régimen existente. El proceso depende de impulsores internos del nicho, como mejoras de precio, rendimiento de la tecnología, escala y economías de aprendizaje, el desarrollo de tecnologías e infraestructuras complementarias.
- Fase 4). La cuarta fase se caracteriza por el sistema sustitución e institucionalización en nuevos regímenes.

La figura 2.14 se muestra la interacción de los tres niveles, nicho, régimen y paisaje en el proceso de consolidación de una nueva trayectoria de transición. Los nichos, como se apuntó, pasan por distintas etapas de desarrollo, desde la experimentación hasta la

institucionalización dentro del régimen. Las distintas etapas reflejan el nivel de retroalimentación entre los diversos elementos. Este modelo enfatiza en el papel de la innovación desde una perspectiva sistemática más allá únicamente del papel del cambio tecnológico.

Figura 2.14. Perspectiva multinivel del proceso de transición basada en el desarrollo de nichos, paisaje y régimen



Fuente: Elaboración propia con base en Geels (2019)

2.2.8.5.1 Críticas al modelo multinivel

A pesar de las bondades analíticas del modelo de transición sociotécnico presentado, existen una serie de críticas que van desde su microfundamentación, unidad de análisis, comportamiento de los actores, entre otras. El mismo Geels (2022) considera que se trata de una metodología carente de microfundamentos pues se asumen ciertas condiciones de reacción de los actores, no se presta atención a la evolución de las técnicas, instituciones y tampoco se explica de manera sólida las retroalimentaciones entre las tres escalas.

Por otra parte, Newell (2021) señala falta de análisis sobre el desempeño de las empresas al asumirse como unidades receptoras de la trayectoria tecnológica adaptarse automáticamente a las innovaciones disruptivas, por lo cual, perfila como un análisis determinista. Expresamente, Labussière y Nadaï (2018) critican la ausencia del espacio geográfico en el proceso y sobre todo apuntan la falta de mecanismos a fin de identificar el proceso de democratización de la ciudadanía, esto es, la forma en que la población civil participa.

Finalmente, en el conjunto de críticas comunes, Upman *et al.* (2019) sintetiza la objeción frecuente del modelo, particularmente sobre la falta de claridad en los mecanismos cognitivos y psicológicos de los actores en el proceso de adaptación y difusión de nuevas tecnologías renovables, del mismo modo, la falta de metodologías para probar la dinámica de los conceptos e implementación de políticas públicas. Añadiendo, frente a la naturaleza de sistemas abiertos, no queda de manifiesto el desarrollo de los nichos sean socialmente aceptados ni tengan alguna valoración energética. Dentro del proceso, tampoco se explica la forma en que se formula una función objetivo entre los actores para combatir el problema ambiental.

2.2.8.6 Hacia una microfundamentación del modelo multinivel: el Modelo Multinivel Bioevolutivo

Los distintos enfoques señalados en este apartado muestran la importancia del nivel sistemático para entender los diversos actores, relaciones, normas y leyes que rigen el proceso de transición. La diversidad de análisis permite contar con metodologías que van más allá del proceso tecnológico e integran dimensiones sociales, políticas, organizacionales e institucionales. Sin embargo, este tipo de modelos, a pesar de hacer referencia a ciertos patrones evolutivos para explicar su dinámica endógena, no existe un fundamento teórico.

Como se señaló en el apartado previo, una crítica a la perspectiva multinivel es la microfundamentación de los actores. Por ello, el fin de este capítulo es proporcionar bases teóricas sólidas, desde el enfoque de economía evolutiva y bioeconomía, para entender la forma en que se gestan las acciones de respuesta de los actores para afrontar el problema

climático y reducir el problema entrópico de la producción, reflejándose en el proceso de transición sociotécnica.

De la lista de modelos expuestos, se considera el Modelo Multinivel como el esquema potencial para entender la dinámica de transición al mismo tiempo que es compatible con la microfundamentación propuesta del punto 2.2.7.1 al 2.2.7.7. En efecto, los desarrollos analíticos para explicar los efectos del impacto entrópico a nivel macro, la internalización del problema en los HSCE, la respuesta endógena de los actores, el proceso de adaptación institucional, adquisición del conocimiento, actualización de rutinas y creación de tecnologías físicas de las empresas y el proceso emergente de innovación endógena, desde la perspectiva del análisis multinivel, se consideran los elementos ausentes en los actuales modelos y se consideran pueden considerarse como fundamentos. En su conjunto, ambas propuestas, pueden dar pauta para explicar la dinámica del proceso de transición sociotécnica.

La figura 2.15 muestra la propuesta original para el análisis de transición denominado **Modelo Multinivel Bioevolutivo**. Con base en los microfundamentos de los actores e internalización del problema ambiental y entrópico, explica la manera en que las relaciones a nivel meso producen que las innovaciones endógenas de nicho logren transformar el régimen energético con base en su desempeño social, económico y entrópico.

Respetando la naturaleza de sistemas abiertos, dinámicos y complejos, no todas las retroalimentaciones, actores y elementos son sustanciales. De manera ideal cada nivel contiene retroalimentaciones intra sistemáticas (al interior), inter sistemáticas (entre elementos independientes del sistema) e interacción sistemática (entre un elemento independiente y el sistema en su conjunto). Asimismo, es posible identificar las condiciones iniciales del sistema (sombreado rojo), los procesos coevolutivos (sombreado negro), núcleo de la transición sociotécnica (sombreado azul) y dinámica de innovación endógena (sombreado negro con rayas).

A *nivel macro* se encuentran aquellos factores que limitan el desempeño micro y meso. La existencia de entropía creciente y el cambio climático afecta al resto de sistema. Simultáneamente, la dependencia hacia los energéticos fósiles y la disponibilidad tecnológica son condiciones iniciales del sistema. En la figura 2.15 se muestra con sombreado rojo.

Al mismo tiempo, el factor entrópico es resultado de la relación social de la comunidad y empresas con su entorno natural, en otras palabras, el incremento entrópico representa un factor coevolutivo que se alimenta de la forma en que las sociedades producen, consumen y gastan energía. Otro par de retroalimentaciones que funcionan como obstáculos son la ubicación de proyectos eléctricos renovables, los costos de la tecnología y la tarifa a los usuarios de las nuevas fuentes energéticas. Particularmente, la cultura energética es un elemento importante para generar retroalimentaciones. Finalmente, el precio de los insumos del régimen energético actual y la disponibilidad tecnológica presente en la estructura artefactual condicionan el desempeño de los nichos.

A nivel micro, los HSC poseen los mecanismos cognitivos suficientes para internalizar los límites macro en sus hábitos y rutinas. A diferencia del mecanismo evolutivo tradicional, y como se apuntó 2.2.7.3 y 2.2.7.4, las empresas tienen una respuesta evolutiva adaptativa frente a su entorno gracias a la derrama de conocimientos existentes en el sistema. Como se muestra en la figura 2.13, la retroalimentación sistemática del conocimiento disponible incide de manera global sobre las capacidades cognitivas, conocimiento disponible, desarrollo de capacidades tecnológicas (físicas y sociales) y actualización de sus rutinas. Gracias a esta retroalimentación, es posible explicar la manera en que las empresas producen una acción creativa adaptativa explicada endógenamente y con base en su comportamiento.

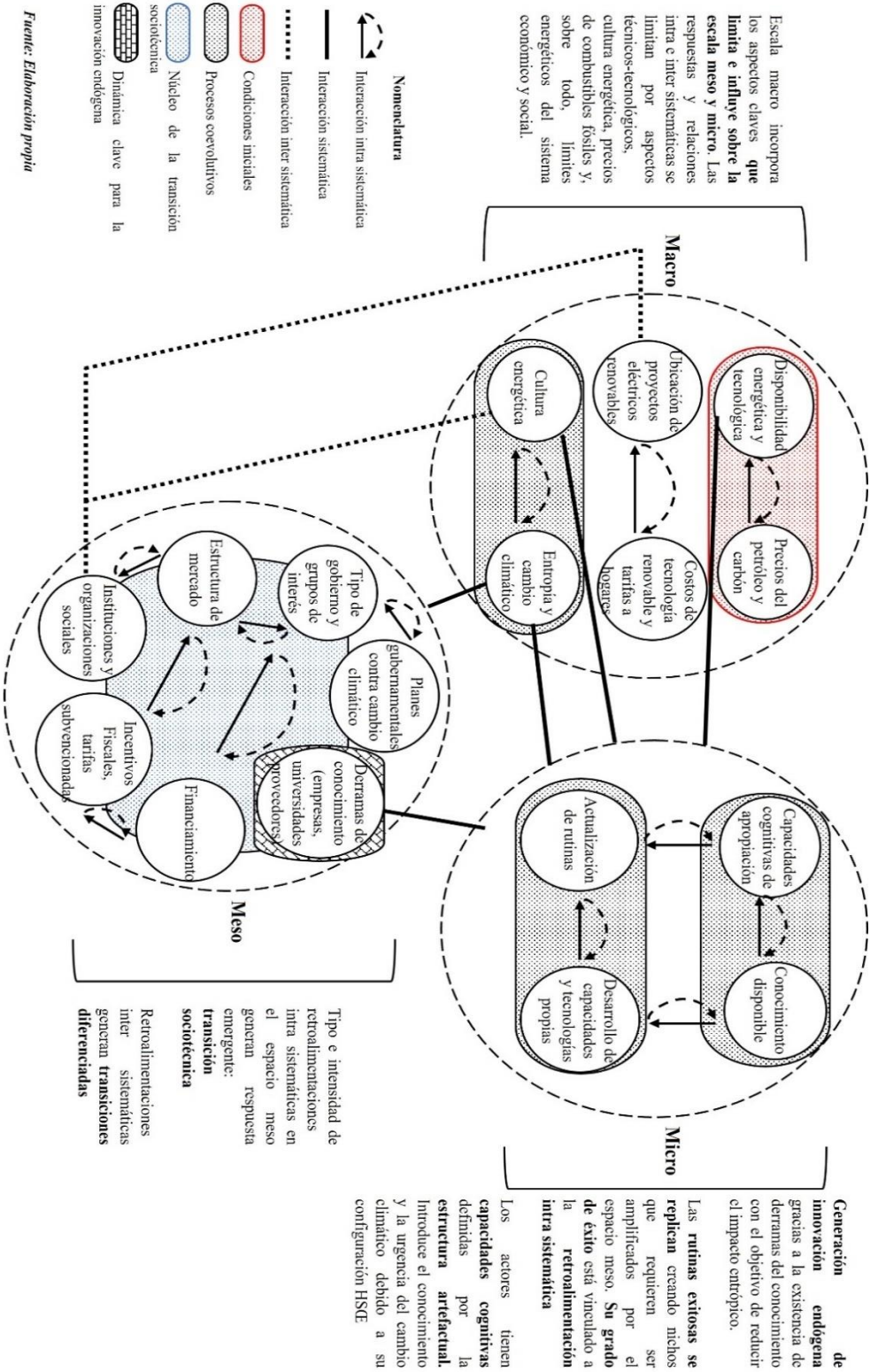
Conjuntamente, la transición sociotécnica y desarrollo de nichos en energías renovables dependerá fuertemente de la derrama y disponibilidad de conocimiento de universidades, gobierno, centros de investigación, competidores y proveedores. Las mejores rutinas seguirán la secuencia del algoritmo evolutivo -variedad, selección y replicación- por las empresas pertenecientes al nicho con base a su rendimiento energético, social y de mercado. Estos elementos pueden englobarse dentro de la dinámica de innovación endógena.

El nivel meso es el punto crucial para el dinamismo de la transición y se considera el núcleo de la transición sociotécnica (sombreado azul). En primer lugar, las retroalimentaciones intra sistemáticas entre el tipo de gobierno y los planes de acción climática determinarán el camino en la estructura de mercado, incentivos, subsidios y financiamiento. En efecto, un gobierno cuya idea política descansa sobre las formas tradicionales de

generación eléctrica difícilmente brindará el apoyo suficiente para el desarrollo de nichos. Es aquí donde sin importar el proceso inventivo y creativo de los actores frente al cambio climático y entrópico, las barreras institucionales limitan cualquier posibilidad de modificación.

En contraparte, un gobierno visionario creará los reglamentos suficientes para la introducción de nuevos métodos energéticos. Asimismo, la efectividad de las políticas dependerá de la eficiencia de las instituciones de cada país. Finalmente, la apertura de la misma configuración del mercado incentiva la aparición de actores emergentes fuera de la dualidad Estado-empresas, por ejemplo, las comunidades y organizaciones energéticas. Su influencia dependerá del tipo de gobierno, financiamiento, cultura energética nacional y los costos de las tecnologías renovables a las cuales pueden acceder para cubrir su propia demanda energética.

Figura 2.15. Estructura Modelo Multinivel Bioevolutivo para la transición sociotécnica



Fuente: Elaboración propia

Con los elementos descritos, se cuenta con un marco integrador que permite evaluar la trayectoria de la transición energética con base en microfundamento de los actores y relaciones. La respuesta de cada país y el éxito de la transición sociotécnica dependerá del tipo e intensidad de retroalimentaciones intra, inter-sistemáticas, procesos coevolutivos, retroalimentaciones, condiciones iniciales, dinámica de innovación endógena y núcleo de transición. Con el modelo multinivel bioevolutivo es posible caracterizar los posibles caminos de la transición en función de los elementos descritos.

Como resultado, el siguiente apartado se desarrolla una taxonomía de las transiciones con base a la dinámica del modelo propuesto. Si bien se muestra 4 tipos de esquema de transición identificables en la literatura, las ventajas del modelo multinivel evolutivo es la posibilidad de proponer otros esquemas de transición emergentes. Es decir, su naturaleza dinámica permite identificar patrones emergentes de la transición

2.2.9 Taxonomía de la transición con base al Modelo Multinivel Bioevolutivo

2.2.9.1 Transición eléctrica comunitaria de ida y vuelta.

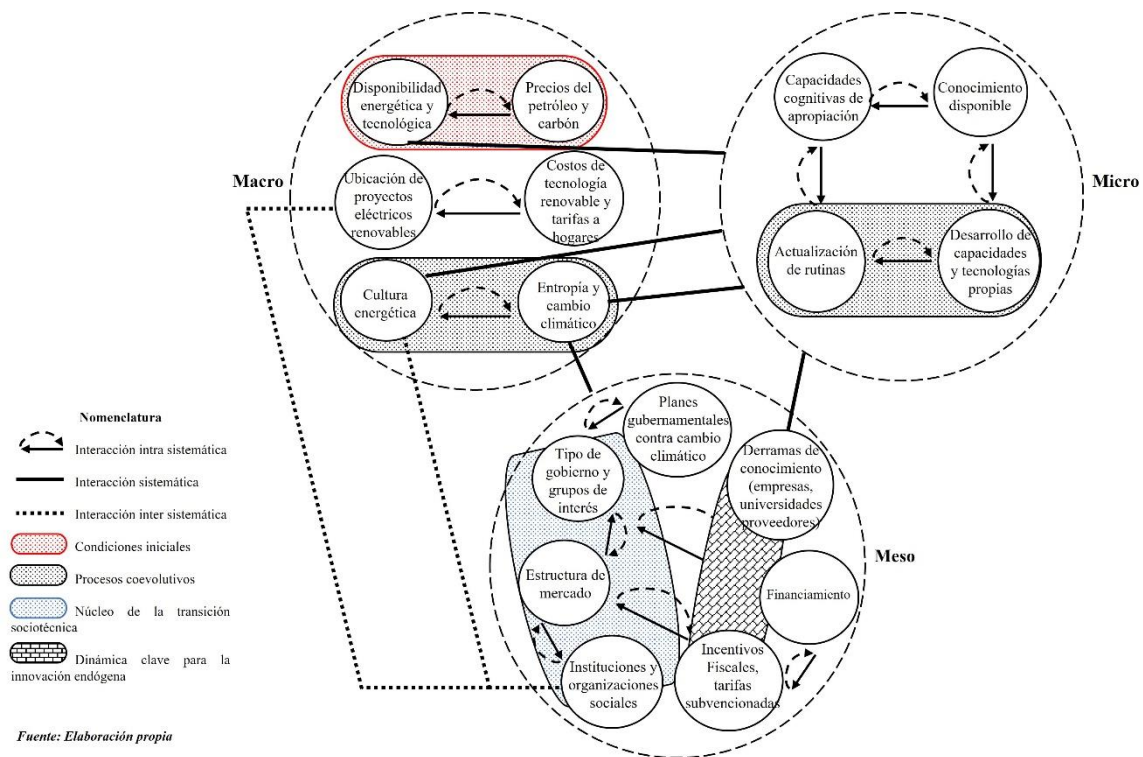
Este esquema se refiere a los países donde el gobierno establece metas claras para lograr la descarbonización del sector con el objetivo de mitigar el problema ecológico y entrópico. La población incide fuertemente por el cambio de la trayectoria energética. Entre sus herramientas, la principal herramienta del gobierno es la apertura del mercado incentivando la participación y colaboración de empresas privadas, públicas y comunidades energéticas. Este tipo de transición se caracteriza por el papel de las tarifas competitivas para pequeños productores, que les permite generar ganancias, financiamiento y certidumbre a sus inversiones. La visión para la consolidación de una trayectoria sociotécnica renovable es de mediano y largo plazo creando mecanismo que brindan certeza más allá del gobierno en curso y son parte de un plan de acción de 10, 20 y 30 años.

Gracias al papel activo del gobierno y la eficacia en el funcionamiento de sus instituciones para la implementación del plan de transición, se consolida un mercado energético que permite a los pequeños productores y comunidades energéticas generar, gestionar y vender su propia energía gracias a la posibilidad de conectarse a la red de

transmisión nacional.

En el espacio macro, se aprovecha la tendencia a la baja del precio de las tecnologías de energía renovable y se conjuga con la capacidad cognitiva de los actores locales para aprovechar las derramas de conocimiento y desarrollar tecnologías propias. Asimismo, el gobierno está sujeto a errores y aciertos en el proceso de transición. Por lo cual, las instituciones se encargan de reducir la incertidumbre y desconfianza en torno a las tecnologías renovables arraigadas en la cultura energética e intenta transformar esta percepción mostrando los beneficios directos en los recibos y los beneficios que la sociedad recibe.

Figura 2.16. Transición eléctrica comunitaria de ida y vuelta en el Modelo Multinivel Bioevolutivo



El término *ida y vuelta* se refiere a los procesos de incertidumbre/certidumbre que el mismo gobierno puede generar o la confianza que promueva. A causa de la resistencia y/o aceptación social de las tecnologías renovables en la cultura energética, este proceso recae sobre el papel del gobierno, conjuntamente, responde a la relación ida y vuelta del gobierno

con la sociedad sometiendo de manera constante a evaluación la pertinencia de la transición. A pesar de los cambios en los precios internacionales del carbón y el petróleo, este modelo de transición continúa su expansión de energías renovables.

La figura 2.16 muestra de manera gráfica este tipo de transición. El núcleo se encuentra en la visión del gobierno respecto al problema ambiental y la transformación energética, así como el grado de certidumbre e incertidumbre. Complementariamente, la estructura del mercado eléctrico, la introducción de pequeños productores y comunidades energéticas que se introducen en la generación eléctrica se consolidan como elementos clave del proceso. Gracias a la presión social el gobierno y las instituciones energéticas se coordinan para transformar el esquema energético actual. Para ello, modifican las condiciones del mercado para la introducción de comunidades energéticas y pequeños productores a fin de que sean un contrapeso a las empresas que generan electricidad fósil. La permanencia de estas empresas en el mercado depende principalmente de las reglas e incentivos en la esfera meso que permitan consolidarse.

En cuanto a los procesos coevolutivos, lo más importante es la preocupación poblacional por el problema del cambio climático y la modificación de la cultura energética. A nivel micro, es crucial la adaptación y actualización de las rutinas productivas con la finalidad de crear nuevas tecnologías. Respecto al proceso de innovación endógena es clave la existencia de derramas del conocimiento, régimen fiscal ventajoso, tarifas de conexión y subvenciones. Finalmente, las condiciones a las que se enfrenta la transición es la dependencia energética fósil y la volatilidad del petróleo y carbón.

2.2.9.2 Transición eléctrica de gobernanza amplificada

Este proceso se caracteriza principalmente por presiones fuertes de la cultura energética nacional para que el gobierno cambie sus pautas de producción energética. En respuesta, el gobierno impulsa una serie de políticas agresivas para crear un mercado competitivo, rentable y sustentable basado en el diseño de política constitucional que sirva de guía para pactar metas objetivos en el tiempo.

A nivel meso, se utiliza las ventajas del mercado internacional para apropiarse del conocimiento y desarrollar nichos tecnológicos. A diferencia del esquema de transición

anterior, éste descansa sobre el desarrollo de nichos tecnológicos de alto nivel en lugar de privilegiar la estructura y conformación del mercado energético. La sustentabilidad del esquema recae sobre la ventaja tecnológica. Para ello, se crean las condiciones crediticias, incentivos fiscales y un programa amplio de inversiones que promueven el nivel tecnológico necesario.

En este caso debe existir una confianza plena en el gobierno, particularmente en las medidas que garanticen la competencia del sector y al mismo tiempo delegue sus responsabilidades a instituciones locales y regionales. De manera paralela, el funcionamiento institucional es eficiente pero rígido porque sólo ejecutan las normas del gobierno central, dicho en otras palabras, tienen poca capacidad de acción autónoma. A causa de ello, el mismo gobierno, frente a variaciones de los precios internacionales de combustibles fósiles, puede detener la marcha de la transición y decidir temporalmente por el esquema convencional de energía sin abandonar la trayectoria de sustentabilidad.

En particular, la innovación radical proviene de la selección, replicación y amplificación de las mejores prácticas para alcanzar, primeramente, el fortalecimiento del sector renovable y después la consolidación a futuro de un sistema energético de vanguardia. El gobierno interviene con la política de transición que los actores se apropian por las condiciones de certidumbre plena.

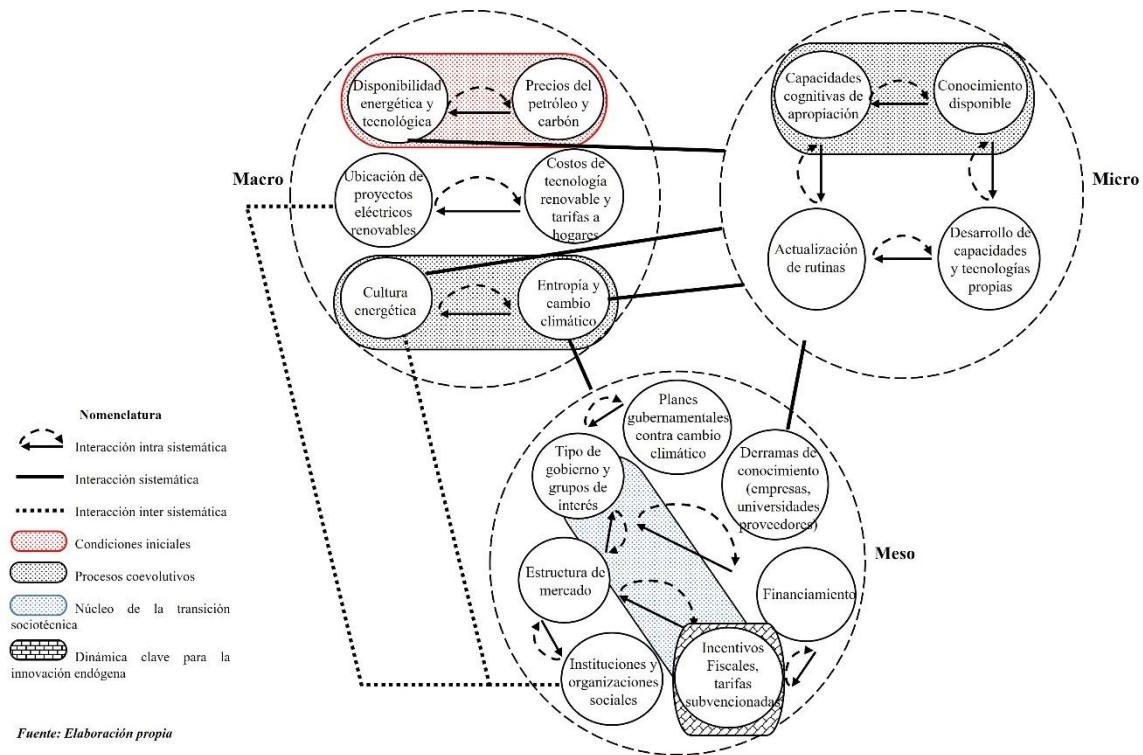
El término *gobernanza amplificada* se refiere a la capacidad del Estado para conservar la gobernanza de la energía al mismo tiempo que amplifica a nivel nacional, regional y nichos un esquema de beneficios atractivos para los participantes, además que les permite expandir sus capacidades de competitividad a nivel internacional gracias a su alto nivel tecnológico.

La figura 2.17 caracteriza este tipo de transición. El papel del gobierno es clave para el desenvolvimiento de la transformación energética. El núcleo se centra en las leyes, acuerdos institucionales, organismos locales y federales, además del esquema de incentivos fiscales, presupuestales y subvenciones. Estos últimos también son pieza clave para el proceso de innovación endógena.

Respecto a los procesos coevolutivos, los más importantes suceden en el nivel micro donde el alto nivel técnico, el conocimiento disponible sobre tecnologías eléctricas renovables

y las capacidades de absorción y creación se combinan para la creación de nichos. El segundo proceso coevolutivo relevante sucede a nivel macro. La población exige transformaciones del esquema productivo a causa del incremento entrópico y del cambio climático. El gobierno toma el liderazgo para solucionar esta exigencia e impulsa este tipo de transición

Figura 2.17. Transición eléctrica de gobernanza amplificada en el Modelo Multinivel Bioevolutivo



2.2.9.3 Transición eléctrica de descentralización variada

Los rasgos característicos de este esquema de transición residen en la creación de condiciones mínimas por parte del gobierno para el funcionamiento del mercado energético. El gobierno tiene una idea de competencia, eficiencia y eficacia que se logra gracias a la liberalización plena. El espacio clave es el diseño del mercado que consiste en mercados mayoristas y minoristas para el despacho de energía. El instrumento principal es la determinación de un precio de equilibrio de oferta y demanda determinado por los costos de producción de la

unidad menos eficiente más un rango de pérdidas.

La descentralización del sistema depende de la creación de organismos independientes que se encarguen de regular el funcionamiento y operatividad de los actores. Existe una gran flexibilidad institucional para lograr esta concordancia. A diferencia de los esquemas previos, aquí el gobierno implementa operadores locales y regionales independientes que se guían únicamente por el plan energético nacional. Asimismo, cada entidad que conforme la nación tendrá metas particulares para lograr el proceso de descarbonización, por lo cual, cada estado plantea una agenda particular y tiene la facultad de asignar sus procedimientos y metas de energía renovable.

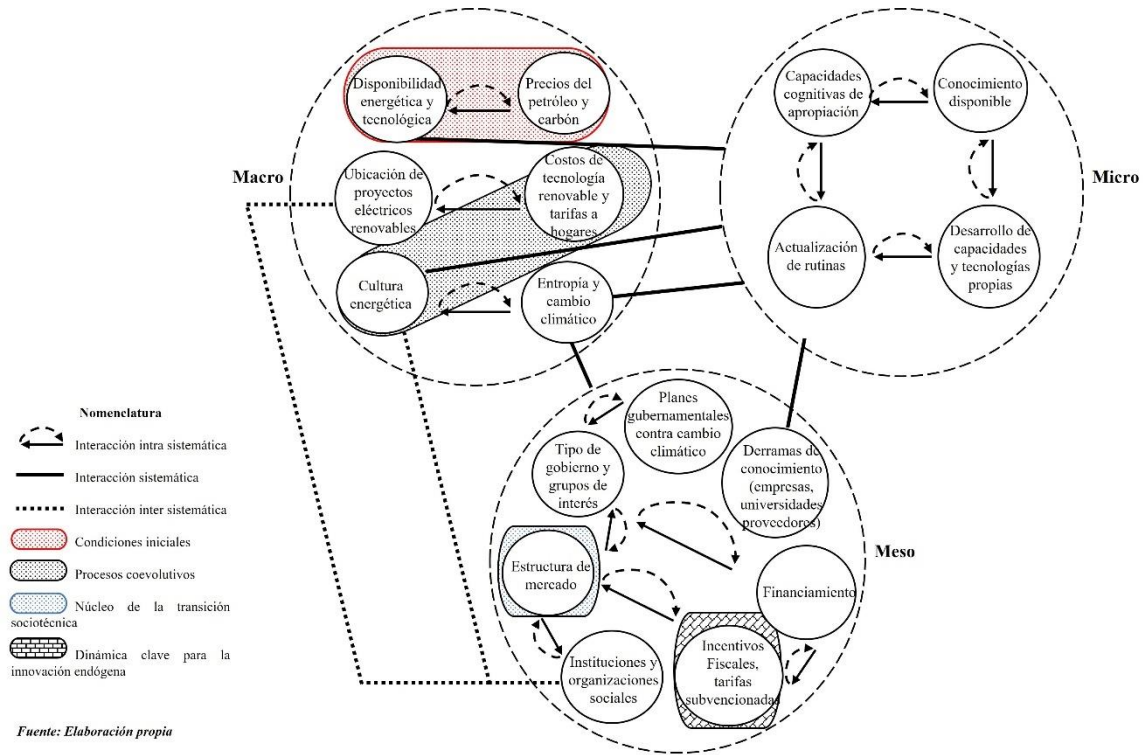
Conjuntamente, la estructura del mercado refleja esta característica pues se integra de agentes públicos, privados, cooperativas energéticas y comercializadores. La participación del Estado se limita a reconocer legalmente de cada figura de producción, plantear un esquema de producción de energía eléctrica base, implementar planes de financiamiento y consolidar las instituciones reguladoras.

Un factor clave para el funcionamiento de este esquema es la cultura energética nacional gracias a la confianza plena sobre la eficacia y eficiencia del proceso descentralizado. El proceso de transición no transforma ningún hábito de consumo ni tiene una agenda de acción particular, se introduce y desarrolla con base en los hábitos y rutinas normados, es decir, se desenvuelve como cualquier otro servicio en una economía de libre mercado. El término *descentralización variada* se acuña debido a que la descentralización institucional, regulatorias y de mercado es la principal figura para alcanzar metas de sustentabilidad.

La dinámica de esta transición es mostrada en la figura 2.18. La dinámica central está en el diseño del mercado donde se asignan los actores y condiciones de competencias. A diferencia del otro tipo de transiciones, ésta limita el papel del gobierno principalmente en las condiciones de competencia, centrándose en la eficiencia y eficacia de la generación. A pesar de esta postura, el proceso coevolutivo que sucede en la sociedad bajo la forma de descontento por el daño ambiental y el malestar por los altos precios del monopolio en la generación de electricidad influye en el diseño del mercado y el impulso de energía eléctrica limpia. De manera conjunta, el principal instrumento para el desarrollo de nichos son las medidas fiscales

y subvenciones. Es decir, el gobierno participa de manera contenida en el creación e impulso de nichos renovables.

Figura 2.18. Transición eléctrica de descentralización variada en el Modelo Multinivel Bioevolutivo



2.2.9.4 Transición eléctrica de régimen y paisaje condicionado

Este tipo de transición puede caracterizar a las economías que recién comienzan su camino hacia la transición sociotécnica. Estos países encuentran su principal límite en el espacio macro. Existen una serie de condiciones previas al proceso de transición que representan un obstáculo. Por ejemplo, la falta de interés sobre los problemas ecológicos, ausencia de tecnología propia, bajos ingresos de la población para pagar los servicios energéticos, gran dependencia de los fuentes fósiles u segmentos de población sin acceso a energía eléctrica.

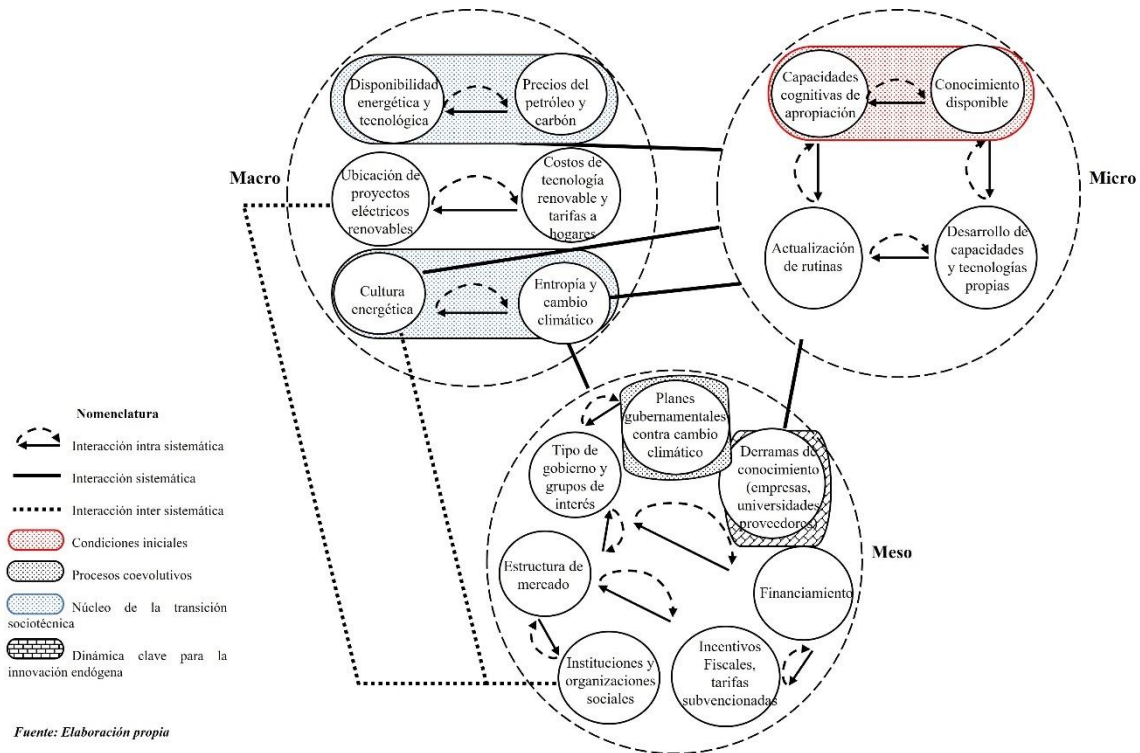
Además, la cultura energética tiene fuerte arraigo al funcionamiento social a fuentes fósiles por lo cual no hay fuertes motivaciones internas para modificar la trayectoria energética. De esta forma, el gobierno se enfrenta a la disyuntiva de resolver problemas sociales antes de incentivar el proceso de transición sociotécnica.

Frente a la falta de demandas locales para cambiar los hábitos energéticos, la presión proviene de los planes internacionales de transición. Como resultado, hay sectores que comienzan a construir un camino hacia la transición energética con el apoyo del gobierno. El impulso proviene del apoyo estatal basado principalmente en la IED, programas de subsidios y obligaciones a otros sectores de la economía para consumir energía renovable producida debido a que la población en general tiene varias limitantes para adquirirla. Respecto al espacio micro, existen dificultades para que las rutinas y hábitos se beneficien de las derramas internacionales del conocimiento, sumándose a la falta de instituciones locales para la creación de capacidades propias.

El término *régimen y paisaje condicionado* hace referencia a la influencia del modelo de Geels sobre la propuesta del Modelo Multinivel Bioevolutivo, donde el régimen refiere al nivel macro y el paisaje es el nivel meso. Las condiciones que limitan el desempeño principalmente responden al nivel macro, particularmente el nivel de ingreso, la disponibilidad tecnológica y dependencia de fuentes fósiles. En conjunto, limitan el desarrollo de la transición sociotécnica.

Finalmente, la figura 2.19 refleja la transición condicionada. El núcleo del proceso no se encuentra en el nivel meso sino en el espacio macro. Debido a la existencia de factores estructurales de la economía como el bajo ingreso, la dependencia de energías fósiles, el bajo nivel tecnológico y la cultura energética acostumbrada al uso de combustibles dificulta el proceso de transición. A medida que estas situaciones se arreglen podría impulsar un proyecto de transición sociotécnica.

2.19. Transición eléctrica de régimen y paisaje condicionado en el Modelo Multinivel Bioevolutivo



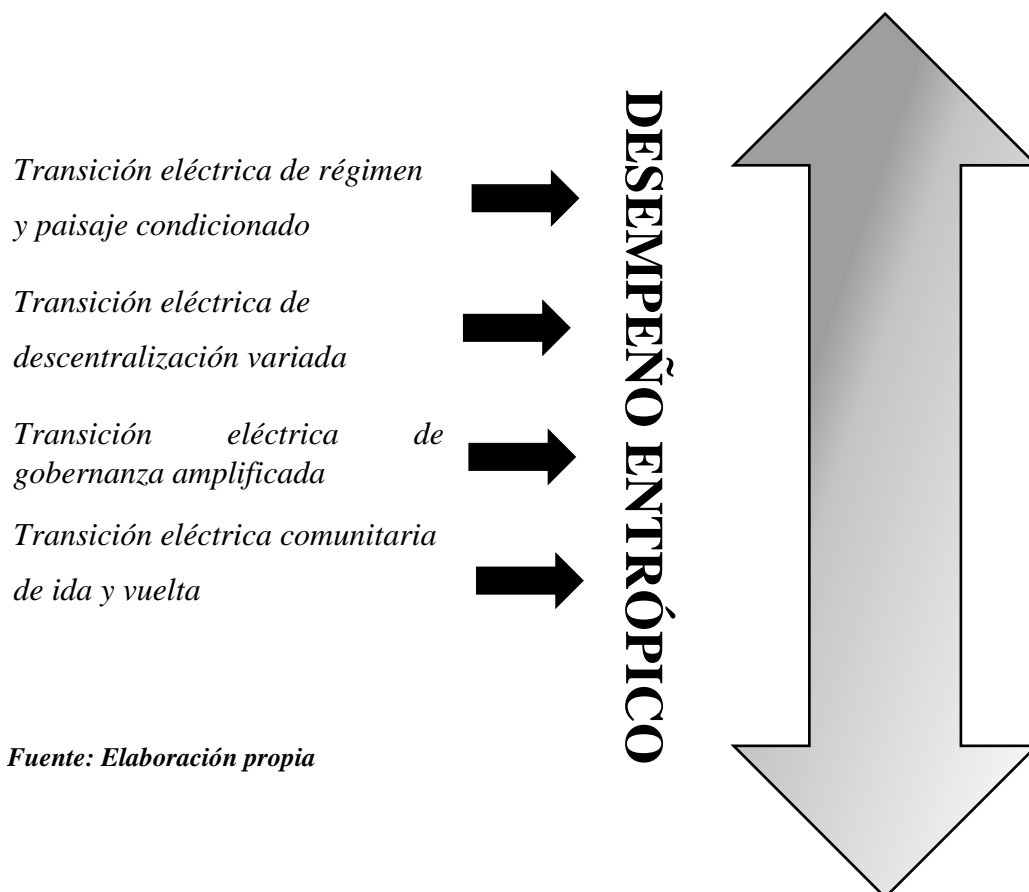
Frente a estos límites, se establecen bases para un futuro proceso de transformación. La clave radica en la conformación de planes gubernamentales con metas para la descarbonización, su desempeño se convierte en un proceso coevolutivo que detona un proceso inicial. Gracias a esta retroalimentación, el desarrollo de nichos y el proceso de innovación endógena comienza con la creación de derramas de conocimiento y tecnológicas. Su aparición puede deberse a las experiencias de empresas extranjeras, colaboración entre gobiernos y proveedores. La dinámica de la innovación se enfrenta a una condición inicial fuerte que se trata del bajo nivel de experiencia tecnológica en el ámbito de energía eléctrica limpia, falta de capacidades en los trabajadores y bajo nivel de absorción del conocimiento.

2.2.9.5 Desenvolvimiento entrópico y dinámica de la taxonomía

Retomando la importancia de la entrópica en los procesos de transición eléctrica, tal como se señaló en un apartado previo del capítulo, todo proceso de cambio en un sistema energético

se enfrenta a la disponibilidad y desenvolvimiento energético. Recordando que la entropía puede entender de manera simple como un indicador de caos del sistema, es importante evaluar cada esquema de transición expuesto en términos de este valor

Figura 2.20. Desempeño entrópico de la transición socioeconómica del sector eléctrico



De acuerdo con la clasificación propuesta y bajo un criterio cualitativo de la entropía como indicador del caos, el régimen de transición *régimen y paisaje* sería el esquema sociotécnico de mayor impacto entrópico. En primer lugar, por la falta de difusión de esquemas tecnológicos eficientes y el predominio de fuentes fósiles que hacen uso de alta entropía, Además, la desarticulación estructural de estos esquemas provoca la existencia de un sector eléctrico descoordinado hacia un objetivo común.

En segundo lugar, el esquema de *descentralización variada* expresa niveles de entropía altos debido a la complejidad en que está constituido el mercado eléctrico. La presencia de autonomía estatal plantea diversas metas de energía limpia y no precisamente los esfuerzos están coordinados.

Posteriormente el esquema de sociotécnico de *gobernanza amplificada* compite por ser el esquema de transición de menor impacto entrópico debido a la encomienda estatal para reducir la dependencia de insumos fósiles. Sin embargo, a pesar de ser un esquema de reducido caos a causa de la buena coordinación entre los actores, el resto del sistema energético sigue liderado por combustibles fósiles. Es decir, mientras la entropía es baja con los nuevos actores de energía eléctrica renovable, para el resto del sistema la entropía es creciente.

Finalmente, bajo la clasificación propuesta el esquema de menor impacto entrópico es el *comunitario de ida y vuelta*. Su capacidad de organización, cooperación y en ocasiones hasta el desarrollo de actividades sin fines de lucro, inducen a las cooperativas, micro y pequeños productores a generar electricidad a baja escala y sólo para abastecer sus necesidades comunitarias.

La relación entre entropía y transición socioeconómica es vital para ampliar la comprensión de los múltiples factores que influyen en este fenómeno. En términos entrópicos, insistiendo en que se refiere a un esquema cualitativo, las innovaciones que permiten una transformación radical están en la esfera meso y no precisamente en un despliegue tecnológico sin precedentes. En el capítulo 4 y 5 se ampliará la idea de desempeño entrópicos no sólo en términos conceptuales sino con indicadores de entrópica termodinámica. Con ello, se podrá incorporar un indicador cuantitativo de cada modelo de transición que sea conveniente a futuro para el caso de México.

Bibliografía

1. Aghion, P. y Howitt, P. (1998). *Endogeneous Growth Theory*. The MIT Press
2. Antonelli, C. (2017). *Endogenous innovation: The economics of an emergent system*

- property. Edward Elgar Publishing.
3. Antonelli, C., y Ferraris, G. (2018). The creative response and the endogenous dynamics of pecuniary knowledge externalities: an agent-based simulation model. *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 13, 561-599.
 4. Antonelli, C., y Ferraris, G. (2018). The microfoundations of evolutionary complexity: From the Marshallian search for equilibrium to Schumpeterian dynamics. *Chapters*, 56-81.
 5. Ayres, R. y Kneese, A. (1969). Production, consumption, and externalities. *The American economic review*, 59(3), 282-297.
 6. Bateira, J. (2010). *Institutions, Markets and Economic Evolution – Conceptual Basis for a Naturalist Institutionalism*. PhD Dissertation, Manchester Business School, The University of Manchester, UK
 7. Beinhocker, E. (2011). Evolution as computation: integrating self-organization with generalized Darwinism. *Journal of Institutional Economics*, 7(3), 393-423.
 8. Beinhocker, E. (2012). New economics, policy and politics. *Complex new world*, 134.
 9. Beinhocker, E. D. (2006). *The origin of wealth: Evolution, complexity, and the radical remaking of economics*. Harvard Business Press.
 10. Ben-Naim, A. (2012). *Entropy and the second law: interpretation and misinterpretationsss*. World Scientific Publishing Company.
 11. Bidard, C., y Klimovsky, E. (2014). *Capital, salario y crisis*. Siglo XXI
 12. Carlsson, B., y Stankiewicz, R. (1991). On the nature, function and composition of technological systems. *Journal of evolutionary economics*, 1, 93-118.
 13. Castaingts, J. (2015). *Dinero, trabajo y poder: una visión de la economía actual latinoamericana para no economistas y economistas*. *Dinero, trabajo y poder*, 1-364. Anthropos
 14. Cattani, G., y Malerba, F. (2021). Evolutionary approaches to innovation, the firm, and the dynamics of industries. *Strategy Science*, 6(4), 265-289.
 15. Ciarli, T., y Savona, M. (2019). Modelling the evolution of economic structure and climate change: a review. *Ecological economics*, 158, 51-64.

16. Conchado, A. (2017). Energy innovation policy: in response to global challenges and the quest for sustainable prosperity. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/26424/TD00323.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
17. Cooke, P., Uranga, M. G., y Etxebarria, G. (1997). Regional innovation systems: Institutional and organisational dimensions. *Research policy*, 26(4-5), 475-491.
18. Crépon, B., Duguet, E., y Mairessec, J. (1998). Research, innovation and productivity: an econometric analysis at the firm level. *Economics of Innovation and new Technology*, 7(2), 115-158.
19. Crutzen, P. (2002, November). The “anthropocene”. In *Journal de Physique IV (Proceedings)* (Vol. 12, No. 10, pp. 1-5). EDP sciences.
20. Daly, H. (1997). Georgescu-roegen versus solow/stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3), 261-266.
21. David, P. (2007). Path dependence: a foundational concept for historical social science. *Cliometrica*, 1(2), 91-114.
22. Davidson, S., y Potts, J. (2016). A new institutional approach to innovation policy. *Australian Economic Review*, 49(2), 200-207.
23. De Haan, F. , Rogers, B. C., Brown, R., y Deletic, A. (2016). Many roads to Rome: The emergence of pathways from patterns of change through exploratory modelling of sustainability transitions. *Environmental Modelling y Software*, 85, 279-292.
24. De Haan, F. J., y Rotmans, J. (2018). A proposed theoretical framework for actors in transformative change. *Technological forecasting and social change*, 128, 275-286.
25. Dopfer, K. (1991). Toward a theory of economic institutions: Synergy and path dependency. *Journal of Economic Issues*, 25(2), 535-550.
26. Dopfer, K. (2004). The economic agent as rule maker and rule user: Homo Sapiens Oeconomicus. *Journal of evolutionary economics*, 14, 177-195.
27. Dopfer, K. (2005). Evolutionary economics: a theoretical framework. *The evolutionary foundations of economics*, 3-55.
28. Dopfer, K. (2006). The origins of meso economics: Schumpeter's legacy (No. 0610).

Papers on Economics and Evolution.

29. Dopfer, K. (2012). The origins of meso economics: Schumpeter's legacy and beyond. *Journal of Evolutionary Economics*, 22, 133-160.
30. Dopfer, K. (Ed.). (2001). *Evolutionary Economics: Program and Scope: Program and Scope* (Vol. 74). Springer Science y Business Media.
31. Dopfer, K. (Ed.). (2005). *The evolutionary foundations of economics*. Cambridge University Press.
32. Dopfer, K., Foster, J., y Potts, J. (2004). Micro-meso-macro. *Journal of evolutionary economics*, 14, 263-279.
33. Dopfer, K., y Potts, J. (2009). On the theory of economic evolution. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 6, 23-44.
34. Dosi, G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research policy*, 11(3), 147-162.
35. Dosi, G., Marengo, L., Bassanini, A., y Valente, M. (2002). Norms as emergent properties of adaptive learning: The case of economic routines (pp. 11-32). Physica-Verlag HD.
36. Eddington, A. *The Nature of the Physical World*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1928
37. Ferreira, V. (2019). Why economics must be an evolutionary science. Lisbon School of Economics and Management. Working Paper WP01/2019/DE
38. Fieguth, P. (2017). Spatial Systems. *An Introduction to Complex Systems: Society, Ecology, and Nonlinear Dynamics*, 169-210.
39. Foster, J., y Metcalfe, J. (2001). Modern evolutionary economic perspectives: an overview. *Frontiers of evolutionary economics: Competition, self-organization and innovation policy*, 1-18.
40. Foster, J., y Potts, J. (2009). A micro-meso-macro perspective on the methodology of evolutionary economics: integrating history, simulation and econometrics (pp. 53-68). Springer Berlin Heidelberg.

41. Freeman, C. (1995). The 'National System of Innovation' in historical perspective. *Cambridge Journal of economics*, 19(1), 5-24.
42. Freeman, C., y Pérez, C. (1988). Structural crises of adjustment, business cycles and investment behavior.-*Technical Change and Economic Theory*. G. Dosi, C. Freeman y otros (eds.).
43. García-Colín, L. (1976). *Introducción a la termodinámica clásica*. Editorial Trillas
44. Geels, F (2002b) Understanding the dynamics of technological transitions. A co-evolutionary and socio-technical analysis. Netherland. Web. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20330346>
45. Geels, F. (2002a). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research policy*, 31(8-9), 1257-1274.
46. Geels, F. (2005). *Technological transitions and system innovations: a co-evolutionary and socio-technical analysis*. Edward Elgar Publishing.
47. Geels, F. (2010). Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective. *Research policy*, 39(4), 495-510.
48. Geels, F. (2019). Socio-technical transitions to sustainability: A review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. *Current opinion in environmental sustainability*, 39, 187-201.
49. Geels, F. W. (2022). Causality and explanation in socio-technical transitions research: Mobilising epistemological insights from the wider social sciences. *Research policy*, 51(6), 104537.
50. Geels, F. W., y Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research policy*, 36(3), 399-417.
51. Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard university press.
52. Grothmann, T., y Patt, A. (2005). Adaptive capacity and human cognition: the process of individual adaptation to climate change. *Global environmental change*, 15(3), 199-213.

53. Haan, J. (2010). *Towards Transition Theory*. Erasmus University Rotterdam. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1765/20593>
54. Holland, J. H. (2002). *Complex adaptive systems and spontaneous emergence*. In *Complexity and Industrial Clusters: Dynamics and Models in Theory and Practice* (pp. 25-34). Heidelberg: Physica-Verlag HD.
55. Horodecka, A. (2017). The methodology of evolutionary and neoclassical economics as a consequence of the changes in the concept of human nature. *Argumenta Oeconomica*, 39(2), 129-166.
56. Jeannot, F. (2020). La competitividad imperfecta en el umbral del coronavirus. *Contribuciones a la Economía*, (2020-02).
57. Kanda, W., del Río, P., Hjelm, O., y Bienkowska, D. (2019). A technological innovation systems approach to analyse the roles of intermediaries in eco-innovation. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1136-1148.
58. Kemp, R. (1994). Technology and the transition to environmental sustainability: the problem of technological regime shifts. *Futures*, 26(10), 1023-1046.
59. Kovalev, A. (2016). Misuse of thermodynamic entropy in economics. *Energy*, 100, 129-136.
60. Labussière, O., y Nadaï, A. (2018). *Energy Transitions. A Socio-technical Inquiry*. Cham: Palgrave Macmillan.
61. Lundvall, B. (1999). National business systems and national systems of innovation. *International Studies of Management y Organization*, 29(2), 60-77.
62. Malerba, F. (Ed.). (2004). *Sectoral systems of innovation: concepts, issues and analyses of six major sectors in Europe*. Cambridge University Press.
63. Markard, J., y Truffer, B. (2008). Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework. *Research policy*, 37(4), 596-615.
64. Mayumi, K. (2017). *Thermodynamics: Relevance, implications, misuse and ways forward*. In *Routledge Handbook of Ecological Economics* (pp. 89-98). Routledge.
65. Mayumi, K., y Gowdy, J. M. (1999). Introduction: theory and reality—the life, work and thought of Nicholas Georgescu-Roegen. *Chapters*, 1-12.

66. McMahon, G. y Mrozek, J. (1997). Economics, entropy, and sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 501-512.
67. Meadowcroft, J. (2009a). Climate change governance. World Bank Policy Research Working Paper, (4941).
68. Meadowcroft, J. (2009b). What about the politics? Sustainable development, transition management, and long term energy transitions. *Policy sciences*, 42, 323-340.
69. Metcalfe, J. (1994). Evolutionary economics and technology policy. *The economic journal*, 104(425), 931-944.
70. Moallemi, E., Aye, L., de Haan, F., y Webb, J. (2016, July). Policy analysis of renewable electricity development in India: From a transition modelling perspective. In the International Conference of the System Dynamics Society, Del, Netherlands, July-July.
71. Moallemi, E. A., de Haan, F. J., y Köhler, J. (2019). Exploratory 13 modelling of transitions. *Modelling Transitions: Virtues, Vices, Visions of the Future*, 228.
72. Moallemi, E. A., Kwakkel, J., de Haan, F. J., y Bryan, B. A. (2020). Exploratory modeling for analyzing coupled human-natural systems under uncertainty. *Global Environmental Change*, 65, 102186.
73. Moore, J. W. (Ed.). (2016). *Anthropocene or capitalocene?: Nature, history, and the crisis of capitalism*. PM Press.
74. Nelson, R. (2005). *Technology, institutions, and economic growth*. Harvard University Press.
75. Nelson, R. (1988). Modelling the connections in the cross section between technical progress and RyD intensity. *The Rand Journal of Economics*, 478-485.
76. Nelson, R. (2001). The coevolution of technology and institutions as the driver of economic growth. *Frontiers of evolutionary economics: competition, self-organization and innovation policy*, 19-30.
77. Nelson, R. (2003). Bringing institutions into evolutionary growth theory. In *Change, transformation and development* (pp. 19-30).
78. Nelson, R. , Dosi, G., Helfat, C. E., Pyka, A., Saviotti, P. P., Lee, K., ... y Malerba, F.

- (2018). Modern evolutionary economics: An overview.
79. Nelson, R. y Winter, S. (1985). An evolutionary theory of economic change. Harvard University Press.
 80. Norgaard, R. (1994). The coevolution of economic and environmental systems and the emergence of unsustainability. *Evolutionary concepts in contemporary economics*, 213-225.
 81. Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
 82. Ostrom, E. (2005). Building a better micro-foundation for institutional analysis. *Behavioral and Brain Sciences*, 28(6), 831-832.
 83. Ostwald, W. (1907). The modern theory of energetics. *The Monist*, 481-515.
 84. Rauch, W., Urich, C., Bach, P. M., Rogers, B. C., De Haan, F. J., Brown, R. R., ... y Deletic, A. (2017). Modelling transitions in urban water systems. *Water Research*, 126, 501-514.
 85. Rip, A., y Kemp, R. (1998). Technological change. *Human choice and climate change*, 2(2), 327-399.
 86. Roberts, C., y Geels, F. (2019). Conditions for politically accelerated transitions: Historical institutionalism, the multi-level perspective, and two historical case studies in transport and agriculture. *Technological forecasting and social change*, 140, 221-240.
 87. Romer, P. (1986). Increasing returns and long-run growth. *Journal of political economy*, 94(5), 1002-1037.
 88. Romer, P. (1994). The origins of endogenous growth. *Journal of Economic perspectives*, 8(1), 3-22.
 89. Ruth, M. (1993). Economics, Ecology and Thermodynamics. *Integrating Economics, Ecology and Thermodynamics*, 111-125.
 90. Rutherford, Malcolm. "The intellectual legacy of Thorstein Veblen: Westport, Conn., Greenwood Press, 1996." *Journal of economic issues* 32.1 (1998): 244-247.
 91. Schneider, E., y Kay, J. (1994). Life as a manifestation of the second law of

- thermodynamics. *Mathematical and computer modelling*, 19(6-8), 25-48.
92. Schumpeter, J. (1947). The creative response in economic history. *The journal of economic history*, 7(2), 149-159.
 93. Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379-423.
 94. Shiozawa, Y., Morioka, M., Taniguchi, K., Shiozawa, Y., Morioka, M., y Taniguchi, K. (2019). *Microfoundations of evolutionary economics* (pp. 1-52). Springer Japan.
 95. Shove, E., y Walker, G. (2007). CAUTION! Transitions ahead: politics, practice, and sustainable transition management. *Environment and planning A*, 39(4), 763-770.
 96. Smith, A., y Stirling, A. (2010). The politics of social-ecological resilience and sustainable socio-technical transitions. *Ecology and society*, 15(1).
 97. Solow, R. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The quarterly journal of economics*, 70(1), 65-94.
 98. Solow, R. (1997). Georgescu-Roegen versus Solow-Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3), 267-268.
 99. Sörqvist, P., y Langeborg, L. (2019). Why people harm the environment although they try to treat it well: An evolutionary-cognitive perspective on climate compensation. *Frontiers in psychology*, 10, 348.
 100. Stiglitz, J. (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3), 269-270
 101. Thaler, R. (2000). From homo economicus to homo sapiens. *Journal of economic perspectives*, 14(1), 133-141.
 102. Tranquillo, J. (2019) *An introduction to complex systems*. Lewisburg: Springer International Publishing,
 103. Ulli-Ber, S. (2013). Conceptual grounds of socio-technical transitions and governance. In *Dynamic Governance of Energy Technology Change: Socio-technical transitions towards sustainability* (pp. 19-47). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
 104. Upham, P., Bögel, P., y Johansen, K. (2019). *Energy transitions and social*

- psychology: A sociotechnical perspective. Routledge.
105. Valdebenito, C. (2007). Definiendo homo sapiens-sapiens: aproximación antropológica. *Acta bioethica*, 13(1), 71-78.
 106. Veblen, T. (2017). *The theory of the leisure class*. Routledge.
 107. Verbong, G., y Geels, F. (2007). The ongoing energy transition: lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004). *Energy policy*, 35(2), 1025-1037.
 108. Vromen, J. J. (2011). Routines as multilevel mechanisms. *Journal of Institutional Economics*, 7(2), 175-196.
 109. Walrave, B., y Raven, R. (2016). Modelling the dynamics of technological innovation systems. *Research policy*, 45(9), 1833-1844.
 110. Wittmayer, J. M., Hölscher, K., Wunder, S., y Veenhoff, S. (2018). Transformation research: exploring methods for an emerging research field. Umweltbundesamt.

CAPÍTULO 3. LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA INTERNACIONAL

Introducción

El objetivo del capítulo es analizar el proceso de transición sociotécnica del sector eléctrico a nivel internacional. A partir del Modelo Multinivel Bioevolutivo (MMB) presentado en el capítulo dos, se identifican los factores a nivel micro-meso-macro que limitan o impulsan el desarrollo de energías renovables. La dinámica del MMB permite construir una taxonomía de de la transición. El análisis se aplica para los casos de China, India, Reino Unido, Alemania y Estados Unidos. Este conjunto de países representa diferentes dinámicas asociadas a la transición del sector eléctrico. Con los resultados se construye una taxonomía de los procesos de transición internacional en el sector eléctrico y se explican las diferencias en su desempeño entrópico. Para brindar un contexto El capítulo comienza con un breve análisis sobre las transiciones más importantes que se han dado en la humanidad y que permite situar la transición energética actual como una respuesta frente a la gran crisis energética y ecológica actual. Después se analizan los principales acuerdos en materia internacional que difunden la necesidad de la transición, posteriormente se justifica el papel del sector eléctrico en el proceso de disminución de ECO₂ y en garantizar una transición energética justa. Finalmente se discute acerca de las metodologías que intentan capturar los elementos de la transición sociotécnica.

Para contextualizar el análisis de la transición, el capítulo comienza con dos grandes apartados. El primero se trata de un breve recorrido de las principales transiciones energéticas en la historia de la humanidad con el fin de situar el retorno a fuentes primarias como el viento, el agua y el sol como estrategia frente a la crisis climática y ambiental que representa la llamada transición energética hacia las energías limpias. El segundo apartado tiene por fin presentar los principales acuerdos internacionales que guían el proceso de la transición a nivel internacional cuyos principios y fundamentos han sido base para el desarrollo de una política particular de cada país contra los efectos adversos del cambio climático.

3.1. De las grandes transiciones energéticas a la problemática ambiental

3.1.1 Del fuego al petróleo: características de las grandes transiciones

El desarrollo de la historia humana está inherentemente vinculada al dominio y utilización de la energía disponible. Goudsblom en su libro *Fire and Civilization* (1992) señala que uno de los descubrimientos del Paleolítico (que va desde hace 2.5 millones de años al 12,000 A.C) fue el fuego. El dominio de esta energía proporcionó luz, calor y protección contra los depredadores. Además, introdujo el primer combustible, el uso de madera seca, para preservar el fuego.

El tránsito al Neolítico sigue representando en la actualidad un periodo del que emanan bastantes interrogantes. Considerada por Childe (1988) como una revolución de la vida humana, la transición neolítica ocurrió hace 12,000 mil años y se manifestó de distintas maneras en cada región del planeta. En particular, el paso de la vida nómada hacia la aparición de los primeros asentamientos representó el comienzo de la recolección y la caza. De acuerdo con Palmer y Floyd (2020) la adopción de cultivos difería entre regiones; por ejemplo, en China prosperó el mijo y arroz mientras en Mesoamérica fue el maíz.

La sofisticación en el proceso de domesticación de animales y plantas propició el incremento de la población y aceleró la competencia por las tierras más productivas. Las sociedades neolíticas se rigieron bajo una vida de subsistencia de la caza y recolección gobernado por los ciclos estacionales (Palmer y Floyd, 2020). Esta forma de organización representa un paso en las fuentes de energías domesticadas por el ser humano. En efecto, de acuerdo Wrangham (2009) el neolítico representa la incorporación de nuevas energías en las sociedades. A diferencia del fuego, se trataban de energías vivas como las plantas y animales. El proceso de domesticación de múltiples especies de animales se denomina apropiadamente por Goudsblom (2012) como *agrarización*³³.

El crecimiento de la población gracias al desarrollo de la agricultura y ganadería produjo cambios en los métodos de producción de alimentos. Siguiendo a Smil (2017), las

³³ Este periodo ha sido objeto de discusiones recientes principalmente por historiadores y antropólogos. Existen diversas preguntas por resolver, principalmente sobre la aparición de la agricultura.

sociedades agrarias al contar únicamente con el sol, el fuego, el agua y la tierra como fuentes energéticas para la generación de sus productos, condujo al agotamiento de las reservas de energía acumuladas, por lo que fue necesario expandir el territorio destinado al cultivo e incrementar la productividad de las viejas técnicas. De esta manera, los monocultivos evolucionaron a cultivos variados que exigieron el desarrollo de nuevos métodos tecnológicos como son técnicas de riego, sistemas de almacenamiento e infraestructuras. Al mismo tiempo, estas modificaciones demandaron mayor número de personas para su operatividad haciendo posible el procesamiento de mayor número de alimentos.

La gran transformación de las sociedades preindustriales (Childe, 1988; Demoule, 2017) así como las sociedades antiguas no hubiese sido posible sin dos elementos. En primer lugar, el desarrollo de herramientas e innovaciones en la creación de artefactos y sofisticación de los procedimientos a fin de aprovechar la energía disipada en el ambiente mientras incrementa la eficiencia en su utilización. En segundo lugar, como señalan Palmer y Floyd (2020) el desarrollo del almacenaje fue relevante para preservar el excedente y permitir el desarrollo del siguiente ciclo productivo.

Estos dos elementos son el sello característico de las siguientes transiciones en la historia de las sociedades. Como se apunta en el capítulo 2, la dinámica del sistema social es resultado de la evolución de múltiples sistemas. Además, el transcurso de los sucesos está vinculado al pasado de los hechos a través de la trayectoria de la dependencia. Así, el desenvolvimiento de las sociedades preindustriales presenció sus límites frente a la demanda creciente de alimentos que exigió la transformación del sistema energético.

En efecto, de acuerdo con Usher (2019) los bastos bosques que cubrieron los paisajes del mundo fueron insuficiente frente a la gran demanda energética mientras que Smil (2017) documenta una deforestación preocupante³⁴ y un incremento elevado del precio de la biomasa. La conjunción de estos factores, junto al desarrollo técnico a lo largo de siglo XVIII y mediados del XIX llevó al remplazo de sistema de energía agro-solar por el sistema fósil-

³⁴ De acuerdo con Foster y Aber (2004) a principios del siglo XVIII el 85% de Massachusetts estaba cubierto por bosques mientras que a finales del siglo sólo el 30%

energético del carbón mineral. Cunningham (2016) afirma que la sustitución fue una nueva experiencia de un enorme potencial de crecimiento de las cantidades de energía disponibles en el núcleo social.

La primera extracción del carbono se realizó en Bélgica en 1113 pero no fue hasta el siglo XVII que Inglaterra logró establecerlo como un combustible (Smil, 2017). El despliegue tecnológico a causa de la Revolución Industrial impulsó la demanda de carbón natural como insumo principal. La consolidación del nuevo paradigma de producción condujo hacia un cambio sustancial en la manera en que las sociedades modificaron los flujos de energía y materiales, mientras Mokyr (1985) afirma que la industrialización permitió a los hombres el acceder a los medios de vida y el control de su entorno ecológico, asimismo Marquardt (2009) la considera una transformación acelerada que terminó con las civilizaciones agrarias predominantes en la evolución humana.

El desarrollo tecnológico fue crucial. La máquina de vapor de James Watt en 1790 representó un éxito comercial sin precedente y transformó la industria extractiva, manufacturera y del transporte (Goudsblom, 2012), además se convirtió en fuente de calefacción de los hogares. A pesar de las potencialidades en términos de eficiencia que representó el carbón hubo fuertes resistencias³⁵. Sin embargo, su difusión fue inevitable impulsada principalmente por la gran disponibilidad, el bajo precio y sobre todo el desarrollo de infraestructura pública como los ferrocarriles que permitió su desplazamiento de las minas hacia las empresas.

La transición hacia el carbón se completó hacia inicios del siglo XX y persistió hasta mediados del mismo siglo. Al igual que sucedió con los bosques, el carbón se agotó y los precios comenzaron a elevarse (Usher, 2019). Frente a los límites energéticos se tuvo que buscar una nueva fuente para afrontar las exigencias de la compleja sociedad. El desarrollo del paradigma energético basado en el carbón consolidó una economía amplia y con creciente

³⁵ En un pasaje interesante del libro de Brimble-Combe (2019), señala que los pobres fueron los primeros en realizar la transición. En efecto, el uso del carbón tuvo severas resistencias por la gran cantidad de humo y el olor que despiden al momento de su combustión, El autor señala que las mujeres de “buena educación” no entraban al interior de habitaciones donde hubiese quemado carbón.

nivel de complejidad. A diferencia del paradigma anterior, la estructura social cambió tanto en su infraestructura, sectores económicos y nivel de dependencia al ser mayor la necesidad del carbón para la dinámica en su conjunto.

Frente a la escasez del carbón y el avance tecnológico del naciente siglo XX, el petróleo se convirtió en la nueva fuente de energía. El crecimiento de la complejidad social que trajo las sociedades industriales requirió un incremento de la demanda energética³⁶. Así, en 1858 en Estados Unidos se financió el primer pozo petrolero en Ontario y tan sólo al año siguiente en Pensilvania se encontró un pozo petrolero a una profundidad de 21 metros, dando inicio el comienzo de la era moderna del petróleo (Smil, 2010).

A diferencia de las anteriores fuentes de energía, la consolidación del petróleo requirió un mayor esfuerzo organizativo para su procesamiento. Se necesitó de un mayor nivel de infraestructura para crear redes de oleoductos, vehículos para su transporte y máquinas para su extracción. Además de los aspectos técnicos existieron otros factores que impulsaron la difusión del petróleo como principal insumo.

Siguiendo con Smil (2010) la recuperación de la posguerra en Europa, la URSS, Japón, así como la época gloriosa de la economía estadounidense en los años 50's estimularon la demanda de petróleo, al igual que los cambios en los patrones de consumo, acelerando la adquisición de automóviles. Junto a ello, la oferta parecía segura, ya que las décadas de 1950 y 1960 fueron las dos décadas récord para el descubrimiento de yacimientos petrolíferos gigantes³⁷.

3.1.2. Abuso de los combustibles fósiles, globalización y crisis climática

Hasta el momento se ha mostrado la forma en que cada estadio de la humanidad trajo

³⁶ De acuerdo con Smil (2010) el uso de madera como fuente de energía fue de alrededor de 100 GJ per cápita en 1860, en comparación con alrededor de 350 GJ per cápita para todos los combustibles fósiles y de biomasa al principio del siglo XXI. En la misma línea, Wang et al. (2020) señalan que antes de 1900, la participación de los biocombustibles en la matriz energética primaria rondaba el 51 %, seguida del carbón con un 47 %. Luego, en 1970, la participación del petróleo y el gas aumentó rápidamente al 57%. Estas magnitudes expresan el incremento energético demandado entre las distintas transiciones.

³⁷ Goldthán y Sitter (2015) en la misma sintonía que Smil (2010) atribuyen a los cambios políticos y económicos un potencial relevante en el cambio de la demanda energética. Consideran que la prosperidad de posguerra produjo un incremento fuerte en la demanda de petróleo, así como la revolución en Irán en 1978-1979, el colapso de Rusia en 1998 y el conflicto entre Rusia y Ucrania representan la disputa por los energéticos.

consigo un proceso singular frente al medio ambiente. Su transformación y asimilación cambió radicalmente las cantidades de energía disponible en las sociedades. Al mismo tiempo, las grandes cantidades de energía consumida han dejado a su paso un problema de contaminación creciente.

De acuerdo con Crutzen y Stoermer (2000, 2002) los últimos tres siglos los efectos de los seres humanos sobre el medio ambiente ha incrementado de manera drástica particularmente por la cantidad de CO_2 . Como resultado, los mismos autores consideran que el impacto ha convertido a la especie humana de ser una categoría biológica a una especie antropológica al modificar con sus actividades los ciclos naturales de la tierra. Estos cambios inauguran una nueva era antropológica denominada Antropoceno.

El Antropoceno sirve para resaltar los cambios ambientales actuales en una escala planetaria y significativa en el tiempo de la historia de la tierra. Malhi (2017) y Zalasiewicz *et al.* (2017) señalan que las principales características de esta nueva era son: i) Marcada aceleración de las tasas de erosión y sedimentación. ii) Cambios bióticos que incluyen niveles sin precedentes de invasiones de especies en la Tierra. iii) El inicio de un cambio significativo en el clima global y el nivel del mar. iv) Perturbaciones químicas a gran escala de los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo y otros elementos y v) Producción de desechos a gran escala³⁸.

Asignar una fecha precisa al inicio del Antropoceno representa un problema para los especialistas debido a que convergen dos ópticas académicas. Por una parte, los geólogos que evalúan el cambio de las condiciones físicas de la tierra en términos técnicos y, por otro lado, los científicos sociales quienes analizan los cambios desde los modelos de producción. Una

³⁸ Al respecto los mismos Crutzen y Stoermer (2002) enumeraron las formas en que la actividad humana estaba cambiando la faz de la Tierra, incluyendo: 1) Un crecimiento de la población humana diez veces mayor en tres siglos. 2) Mantener 1.400 millones de cabezas de ganado que producen metano. 3) Explotación del 20 al 50 % de la superficie terrestre de la Tierra. 4) Destrucción de selvas tropicales. 5) Construcción generalizada de presas y desviación de ríos. 6). Explotación de más de la mitad del agua dulce accesible. 7) Una disminución del 25 por ciento de los peces en las regiones oceánicas. 8) Un aumento de 16 veces en el uso de energía en el siglo XX, elevando las emisiones de dióxido de azufre a más del doble de los niveles naturales. 9) Uso de más del doble de fertilizante nitrogenado en la agricultura que el que se usa naturalmente en todos los ecosistemas terrestres combinados. 10) Aumento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero a sus niveles más altos en más de 400.000 años

parte fuerte de la comunidad científica fecha al Antropoceno desde el siglo XVIII, particularmente a la Revolución Industrial, como el comienzo de las modificaciones del planeta debido al gran consumo energético que demandaron las sociedades industriales y la carga demográfica precedente en las sociedades agrarias.

Sin embargo, desde la postura de Crutzen y Stoermer el Antropoceno se sitúa a mediados del siglo XX gracias a la gran demanda de energéticos fósiles, actividades económicas y ECO_2 ³⁹. Esta afirmación se fortalece con Yergin (2020) quien señala que la transición completa del petróleo al carbón se efectuó hasta 1960. Además, Newell (2021) señala que la globalización de la economía mundial en los años 80's y 90's trajo consigo sistemas internacionalizados de la producción, finanzas desreguladas y olas de liberalización comercial que se han encerrado en un modelo industrial global orientado a la exportación y de uso intensivo de energía⁴⁰.

El uso intensivo del petróleo en las actividades económicas durante la era dorada del capitalismo provoca el interés de la comunidad científica durante los años de 1960 a desarrollar instrumentos meteorológicos para medir la concentración de gases efecto invernadero en la atmosfera. Tal y como señalan Aggeri y Cartel (2017) es la década donde, desde una perspectiva científica, se confirma que las variaciones de la temperatura y el daño a la capa de ozono tienen orígenes antropocéntricos. Es decir, esta dinámica predatoria y dañina contra la naturaleza inherente de los últimos tres siglos a raíz del cambio productivo, revolución técnica y energética pudo comprobarse hace apenas 60 años atrás. El interés se sobre las ECO_2 radica en que, de acuerdo con Lenzen *et al.* (2020) durante 2018 las ECO_2 representaron aproximadamente el 74% del total de emisiones globales de gases de efecto

³⁹ Esto no quiere decir que previo a esta fecha no hayan existido cambios en las condiciones climáticas. Tunker (2020) señala que el periodo medieval del año 1000 al 1200 se caracterizó por un incremento de la temperatura entre 1.2 y 1.4 grados Celsius acompañado de 10% más de lluvias respecto al siglo pasado. Estos fenómenos en conjunto hicieron posibles incrementos de la cosecha y del excedente mientras que la semilla del feudalismo puede encontrarse el tránsito hacia el capitalismo posiblemente gracias a la tierra y los recursos maderables, época con grandes niveles de deforestación. Asimismo, Warde *et al.* (2018) señalan que el preludeo a la revolución industrial fue testigo de un incremento en las concentraciones de CO_2 y metano principalmente por inventos cuya fuente energética es el carbón

⁴⁰ Como resultado, Rees (2020) indica que la mitad de la energía fósil jamás utilizada y la mitad de ECO_2 jamás producido se ha quemado en los últimos treinta y cinco años.

invernadero.

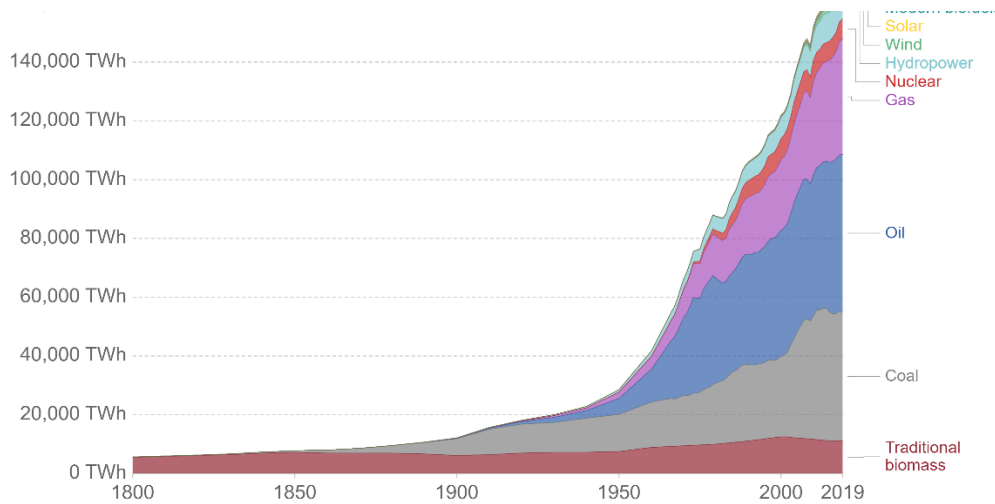
La manifestación extrema de los daños al ambiente se ha venido encruceciendo los últimos 10 años del siglo XXI. El estudio de Balzani (2019) calcula que en 2018 a nivel mundial se quemaron por segundo 250 toneladas de carbón, 1140 barriles de petróleo y 102,220 metros cúbicos de gas, equivalentes a 11,074 toneladas de dióxido de carbono. Por otra parte, Fuzzi (2019) estima que el incremento del consumo energético se ha multiplicado en 16 veces respecto a la época previa a la industrialización provocando un incremento de la temperatura planetaria, mientras el último informe de la World Meteorological Organization (2020) detalla que las consecuencias del cambio climático se intensificaron durante el período 2015-2019, considerándose el quinquenio más cálido en la historia de la civilización humana (Lindsey y Dahlman, 2020).

Para dar cuenta del deterioro ambiental a nivel estadístico se recurre a ciertos indicadores que vinculan el desempeño económico y su efecto ambiental. Se muestran a continuación algunas series de datos construidas por Our World in Data con el fin de contar con evidencia descriptiva acerca de la problemática expuesta⁴¹.

En la gráfica 3.1 se muestra el consumo de fuentes primarias de energía mundial de 1800 hasta 2019. Durante más de 100 años el mundo dependió exclusivamente de biomasa tradicional (es decir, materia orgánica como madera) y carbón, mientras el petróleo se volvió preponderante a partir del primer tercio del siglo XX, a diferencia de las fuentes alternativas de energía, principalmente nuclear e hidroenergía, que emergen en la última trentena del siglo anterior. El esquema de consumo energético mundial durante los últimos 200 años generó un gran nivel de CO₂. De acuerdo con Lelieveld *et al.* (2019) las repercusiones del consumo de combustibles están relacionado con la contaminación del aire, variaciones del clima, cambios en el ciclo hidrológico y con el 65% de muertes atribuibles al aire de mala calidad.

⁴¹ Se recurre a esta fuente de información y las gráficas debido a lo difícil que resulta acceder a series de largo plazo entre países de manera gratuita. La gran mayoría son de alto costo, mientras el Banco Mundial o la Agencia Internacional de Energía (AIE) ofrecen información parcial, de corto plazo o incompletas para el comparativo entre naciones. Mientras *Our World in Data* ofrece de manera altruista y gratuita ciertos indicadores que de otra manera únicamente podrían conocerse comprando la información.

**Gráfica 3.1 Consumo de energía primaria. Países seleccionados 1800-2019.
(Consumo por tipo de fuente primaria)**

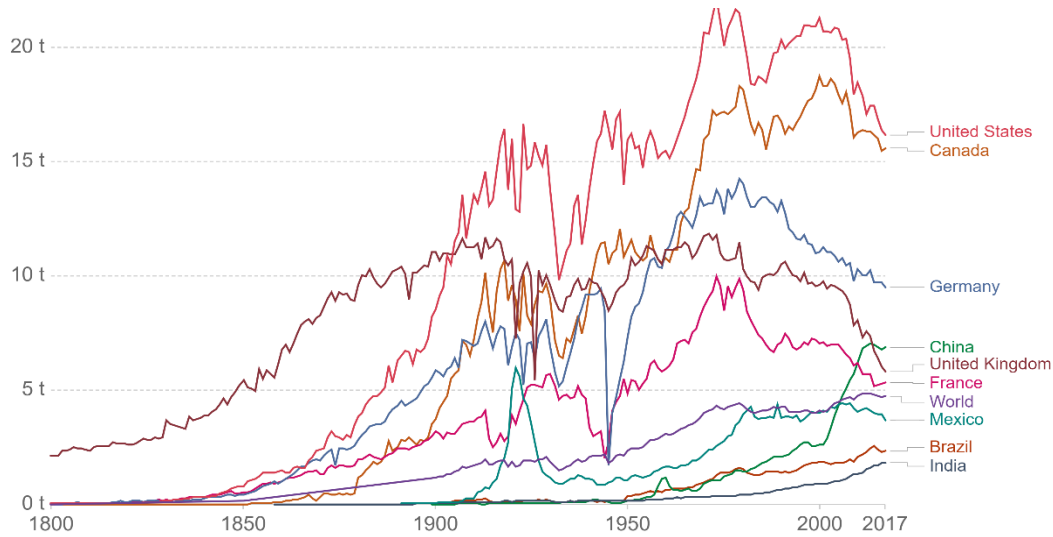


Fuente: Our World in data con base en BP Statistical Review of World Energy (2020)

En la gráfica 3.2 detalle la evolución de las emisiones por habitante en países seleccionados desde 1800 hasta 2017. Diversos autores señalan discrepancias en la generación de emisiones entre países de alto, mediano y bajo ingreso principalmente a su nivel de industrialización. El gráfico da cuenta de esas diferencias. Reino Unido lideró las emisiones hasta 1900 por ser la cuna de la revolución industrial, posteriormente superado y liderado por Estados Unidos en sincronía de Canadá, mientras naciones como Alemania y Francia son superiores al promedio internacional. En contraste, países considerados emergentes como Brasil, India y México muestran niveles por debajo del nivel mundial a excepción de China durante el transcurso del actual siglo⁴².

⁴² En el caso de México se muestra un nivel superior incluso a Francia y al promedio mundial durante los años de 1930. Al respecto Cárdenas (1987) y Tannenbaum (1951) apuntan el proceso sustitutivo de importaciones e intensidad de industrialización las causas de altos niveles de consumo petrolero y por tanto de emisiones.

Gráfica 3.2 ECO2 por habitante. Países seleccionados 1800-2017.
(Emisiones por consumo de fuentes fósiles)



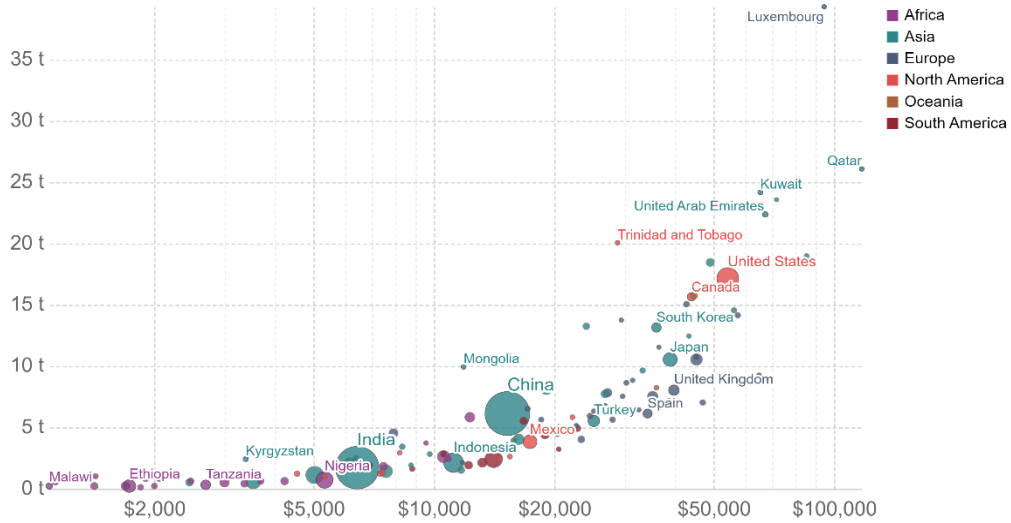
Fuente: *Our World in data con base en Global Carbon Project (2020)*

Los diferenciales entre países industrializados, intermedia y baja industrialización ha sido una preocupación científica. A partir del reporte *The Limits to Growth* a cargo de Donella Meadows (1972), se planteó una relación potencial entre la calidad del ambiente y el crecimiento económico⁴³, desarrollándose su estudio dentro de la literatura económica bajo la hipótesis de Kuznets.

El mecanismo detrás de este aporte establece una relación entre las emisiones contaminantes y el ingreso per cápita. De manera gráfica, tal como se mencionó en el capítulo 1, esta relación toma una forma de “U” invertida. El punto común de los estudios afirma que las primeras etapas de crecimiento económico coadyuvan el ascenso de la contaminación y disminuye a niveles más altos del ingreso, justificando el deterioro ambiental a medida que la riqueza incrementa. En las gráficas 3.3 y 3.4 analizan dos puntos en el tiempo, 1990 y 2017, con el fin de comparar la vigencia de esta relación empírica en una serie de países seleccionados.

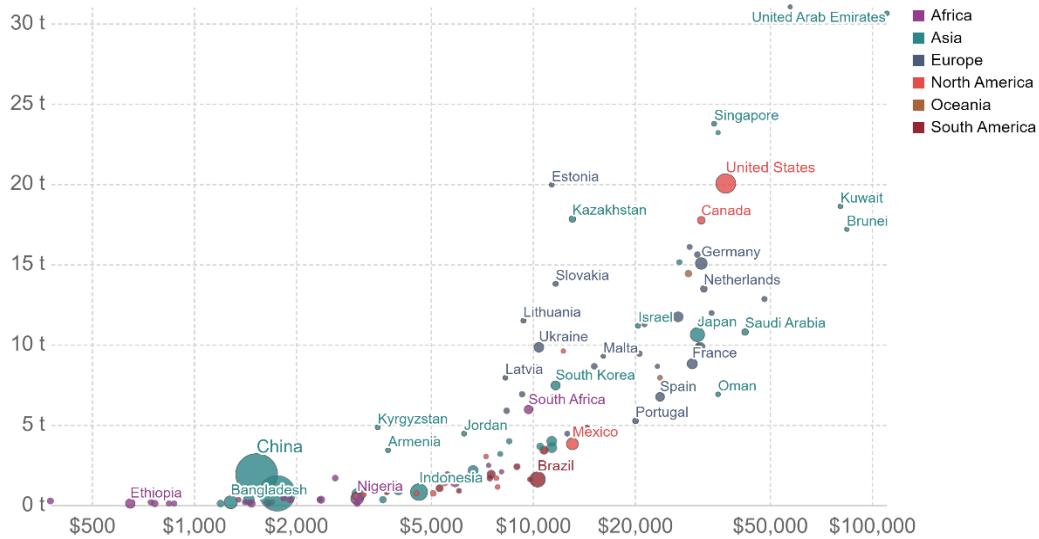
⁴³A partir de dicho informe, se desarrolló una extensa bibliografía que afirma de manera empírica el vínculo entre ambas, Véase ejemplo, Bilgili *et al.*, 2016; Mikayilov *et al.*, 2018; Munir *et al.*, 2020.

Gráfica 3.3 ECO2 por habitante y PIB por habitante. Países seleccionados, 2017.
(PIB ajustado PPA e inflación)



Fuente: Our World in data con base en Global Carbon Project (2020)

Gráfica 3.4. ECO2 por habitante y PIB por habitante. Países seleccionados, 1990.
(PIB ajustado PPA e inflación)



Fuente: Our World in data con base en Global Carbon Project (2020)

Observando el desempeño de ambos indicadores, existen resultados heterogéneos. Por un lado, los países industrializados mantienen altos niveles de ingreso y contaminación como el caso de Estados Unidos, Luxemburgo y Canadá. Por otro lado, países como Corea del Sur, Japón e Indonesia han elevado su crecimiento por habitante conteniendo los niveles de ECO₂ mientras China e Indonesia han incrementado drásticamente su ingreso acompañado de emisiones.

A falta de un estudio econométrico para analizar el periodo de 27 años, la idea acerca de que el crecimiento económico traerá consigo mejoras ambientales únicamente ha dado como resultado crecientes desigualdades ecológicas y económicas que afectan a los países de ingreso medio- bajo a costa del beneficio de naciones industrializadas que degradan el ambiente planetario obteniendo mayores ingresos, a su vez, promoviendo una mayor demanda de mayores servicios energéticos creando un círculo adverso contra el ambiente.

Recapitulando los resultados en las gráficas precedentes, se observa el problema que ha conducido un patrón productivo guiado por fuentes primarias de energía en términos de ECO₂ y sus efectos para el ambiente, variaciones climáticas y salud humana. Además, en el plano internacional, el problema climático parece ser resultado del actual estilo de desarrollo de las economías industrializadas quienes, además de concentrar los mayores niveles de ingresos, son las generadoras de mayor deterioro ambiental. Desde esta perspectiva, la crisis energética y cambio climático son factores que incrementan la desigualdad ambiental y económica (Stiglitz, 2015), afectando severamente a países de medio y bajo desarrollo.

En efecto, además de las afectaciones comunes que causa las malas condiciones climáticas a los seres humanos y cualquier ser biológico, estas consecuencias se magnifican en función de la estructura gubernamental, institucional y económica de cada país. Algunos ejemplos son los siguientes: Famzy *et al.* (2020) menciona que durante 2018 un total de 68.5 millones de personas se vieron afectadas por desastres vinculados al clima, representando 131 mil millones de dólares. Islam y Winkel (2017) señalan que la problemática ambiental genera un círculo vicioso en países pobres donde la desigualdad inicial se manifiesta en desigualdad agravada a raíz de su mayor exposición, susceptibilidad y baja capacidad de respuesta al daño ambiental.

En la misma línea, King y Harrington (2018) apuntan que de no evitar el incremento de la temperatura planetaria, la pobreza y los riesgos climáticos incrementarán. De tal forma, el 80 % de personas más pobres tiene 54% más de probabilidad de sufrir los efectos del cambio climático respecto al 20% de personas ricas. Mientras Eastin (2018) apunta que la distribución de los efectos climáticos sobre las mujeres en naciones en vías de desarrollo es mayor que hacia los hombres, restringiendo su incorporación al mercado laboral.

Las diversas problemáticas a causa del cambio climático han creado cierto nivel de conciencia y alarma internacional. El tránsito de la sociedad debido a la industrialización trajo un balance desfavorable para los balances energéticos y materiales de la naturaleza en comparación de épocas previas. La noción aristotélica y bíblica que sitúa al medio ambiente como proveedor de las necesidades humanas a la luz de las problemáticas ambientales genera un debate acerca de una nueva forma de pensar la relación entre sociedad y naturaleza. Es así como los gobiernos de la comunidad internacional comienzan a crear diversas agendas de acción colaborativa contra el daño ambiental.

3.1.3 Energías renovables: la última transición

En tiempos preindustriales, los biocombustibles (específicamente la madera) eran la principal fuente de energía y se usaban para calentar y cocinar. Durante la revolución industrial, el carbón se convirtió en la fuente predominante de energía y fue sumamente necesario para satisfacer las necesidades de la industria y el transporte ferroviario. A mediados del siglo XX, el petróleo superó al carbón, ya que su forma líquida proporcionaba un combustible conveniente para el transporte por carretera.

Desde entonces, los combustibles fósiles en forma de petróleo, gas natural y carbón constituyeron la gran mayoría del uso de energía primaria en todo el mundo. Sin embargo, durante la última parte del siglo XX se hizo cada vez más evidente que el uso continuado de combustibles fósiles como nuestra principal fuente de energía no era sostenible. Frente a la cantidad de emisiones generado por la quema y uso de fuentes fósiles, el mundo intenta encontrar fuentes de energía que tengan menor impacto ecológico al tiempo al tiempo que satisface significativamente la demanda creciente de la población.

Existen diversas dificultades para transformar a matriz energética, entre los más

destacables son la dependencia de las fuentes fósiles y la tendencia del consumo por habitante.

De acuerdo con la AIE (2022), el consumo energético del mundo sigue liderado por las energías convencionales (30% petróleo, 24% gas, 10% electricidad, 26% carbón, 10% biomasa) a pesar de que, durante el año de la pandemia en 2020, el consumo disminuyó en 4%. Además, el consumo por habitante a lo largo de la historia ha mostrado una tendencia exponencial. La figura # exhibe la trayectoria de largo plazo sobre el consumo por habitante en el tiempo. En la época previa al descubrimiento del fuego el consumo por habitante se estima en 100 W mientras en los inicios del siglo XXI esta cantidad incrementó hasta 10, 000 W.

Los efectos ambientales perjudiciales de la quema de combustibles fósiles implican que los patrones actuales de uso son insostenibles a largo plazo. De esta manera, Kale (2017) apunta acertadamente que la humanidad se enfrenta a los siguientes problemas: (i) la naturaleza finita de los materiales de combustibles fósiles (ii) el daño de las emisiones y (iii) la necesidad de sostenibilidad ecológica, es decir expandir los suministros de energía renovable y usar la energía de manera más eficiente.

A fin de reducir el impacto ecológico, el mundo ha comenzado el desplazamiento de su consumo energético hacia fuentes alternas. Las energías renovables son aquellas que se obtienen de flujos naturales y persistentes de energía que es posible obtenerla inmediatamente. Mientras, la segunda categoría son las reservas estáticas de energía que permanecen bajo tierra a menos que sea liberada por la interacción humana (Aklin y Urpelainen, 2018). Siguiendo a Anani (2019), Penna (2020) y Zepf (2020) las fuentes renovables pueden clasificarse de la siguiente manera, considerando los elementos técnicos que inciden en su operabilidad.

Cuadro 3.1. Tipos de energías renovables y factores técnicos que inciden en su operación

Tipo de energía	Descripción	Factores técnicos que inciden en su operabilidad
<i>Energía eólica</i>	Energía que proviene del viento que normalmente se transforma en energía mecánica o eléctrica	Calidad del aerogenerador acoplado al generador eléctrico para producir electricidad
<i>Energía solar</i>	Proveniente del sol, se recoge para calentar fluidos como agua y aire. Con ello, se genera calor, movimiento, luz o electricidad	Materiales que conforman los módulos fotovoltaicos y semiconductores. En un primer momento para la transmisión de la energía y después para su procesamiento de reciclaje
<i>Hidroeléctrica</i>	Energía que proviene de la caída o el flujo de agua. La energía hidroeléctrica proviene de capturar el poder del agua en movimiento; a medida que el agua sale del depósito, fluye a través de una turbina y la hace girar.	Se debe principalmente a 4 factores: La eficiencia de las turbinas, el flujo a través de la tubería forzada, los engranajes y la turbina
<i>Biomasa</i>	Se refiere a cualquier materia orgánica disponible de forma renovable. Todos ellos incluyen carbono que se traduce en la fuente de energía	El uso de biomasa tiene una serie de ventajas. Entre ellas, su inmediata disponibilidad o rápida reposición. Al momento de quemarse los combustibles de este origen únicamente liberan dióxido de carbono útil durante su gestación, provocando que el carbono emitido sea absorbido de manera natural. La abundancia de diversos desechos permite a las
Fuentes primarias de biomasa	Incluye a las plantas que se han cultivado específicamente para ser utilizados como biocombustibles	
Biomasa leñosa	Se obtiene de árboles compuestos de carbohidratos, lignina, celulosa y hemicelulosa. Su producción se realiza en bosques designados.	

Materiales celulósicos	La bioenergía celulósica proviene del cultivo de paja. EL cultivo más conocido es el miscanthus	comunidades generarlo de manera local y a bajo costo, al tiempo que disminuyen los efectos adversos de sus residuos sin utilidad. Respecto a sus desventajas el riesgo de deforestación y cambio de propiedades de la tierra a fin de contar con los granos suficientes respecto a la demanda global. En diversos casos se prefiere usar la tierra para obtener biocombustibles en lugar de generar alimentos. Por otro lado, se requieren grandes espacios para conservar la materia prima y suelen ser menos eficientes que los combustibles fósiles, de esta manera, incrementa el nivel de producción y sus riesgos asociados.
Cultivos azucarados	Fuente de energía proveniente del maíz y caña de azúcar. La fermentación de estos elementos genera combustible bioetanol.	
Semillas oleaginosas	Extracción de aceites y bioenergía de soja, colza y semillas de girasol.	
Microalgas	Posible encontrarlas en aguas dulces. Elementos altos en grasas que permite producir biodiésel y biopetróleo	
Fuentes secundarias de biomasa	Se refiere a las fuentes energéticas que provienen de desechos industriales, desechos agrícolas, subproductos, desechos domésticos y productos no deseados de actividades humanas	
Residuos de madera	Leña proveniente de árboles disponible para producir electricidad o calor.	
Coproductos de cultivos	Residuos de trigo, maíz, caña de azúcar, arroz y otros granos.	
Desechos animales	Descomposición aeróbica del estiércol resultando en metano y óxido nitroso	
Residuos sólidos urbanos	Desechos provenientes de la basura generada en los hogares	
<i>Geotérmica</i>	Las fuentes de este calor incluyen la fricción de los fluidos que se mueven en el núcleo de la Tierra, la descomposición radiactiva de los elementos en el manto y la presión del peso del planeta	
<i>Energía de olas</i>	Aprovechamiento de la fuerza generada por las olas	Los dispositivos de olas en la costa se colocan más cerca de la tierra y tienen la ventaja de

		estar cerca de la red de servicios públicos y son relativamente fáciles de mantener. Los dispositivos de olas cerca de la costa se pueden colocar en aguas poco profundas. Los dispositivos de olas en altamar colocados en aguas profundas están atados al lecho marino y tienen una energía potencial mucho mayor, pero son difíciles de construir, operar y mantener.
<i>Energía mareomotriz</i>	Utiliza el flujo y reflujo de las mareas, a medida que entran y salen	Una presa de marea es más similar a las instalaciones hidroeléctricas, en el sentido de que las mareas entrantes se acumulan detrás de la estructura similar a una presa y fluyen a través de una tubería.

Fuente: Elaboración propia con base en Anani (2019), Penna (2020) y Zepf (2020))

A pesar de que los últimos años los principales foros internacionales insisten en la idea del desarrollo sustentable y el papel de las energías renovables, puntos a debatirse en el siguiente apartado, las fuentes renovables han estado presentes de manera constante en la historia humana. La principal diferencia entre las épocas en el desarrollo tecnológico necesario para convertirlas en fuentes de energía de amplio alcance y escalable.

Penna (2020) hace un excelente recorrido histórico de la difusión de energías renovables. Por ejemplo, la energía solar es aprovechada desde 1767 en Sudáfrica gracias a la creación del primer panel solar en Sudáfrica. Estos primeros inventos fueron desarrollando e incrementando su eficiencia. En 1905 el artículo de Albert Einstein “Concerning the Production and Transformation of Light” fue la fundamentación teórica que permitió comprender el fenómeno fotovoltaico (Yergin, 2020). Además, durante la segunda mitad del siglo XX el físico Gerald Pearson 1953 revolucionó los primitivos paneles solares al utilizar el silicio para su fabricación. La energía eólica es más fuerte en los hemisferios norte y sur, donde dominan los vientos del oeste.

Otra de las fuentes renovable que históricamente impulsó el desarrollo civilizatorio fue la energía del viento, la energía eólica. La primera forma de utilizarla fue usando las velas

de los barcos. Los primeros registros se encuentran en el antiguo Egipto durante los viajes en el río Nilo. Sin embargo, el gran salto hacia la industria naval fueron las navegaciones de larga distancia durante la dinastía Han entre el año 25 y 220 de nuestra era (Penna, 2020).

En tierra, la energía eólica fue utilizada para el funcionamiento de molinos en Persia durante el año 1000. Esta influencia llegó hasta Europa, principalmente Inglaterra en 1137 donde se registra el primer molino alimentado con energía eólica (Smil, 2017). Los molinos se convirtieron en la principal herramienta que permitió el aprovechamiento de la energía del viento. Su llegada a América fue en Estados Unidos donde se han instalado aproximadamente 6 millones de unidades eólicas de pequeña escala entre 1850 y 1970 (Penna, 2020). Esta energía se utiliza principalmente para generar electricidad y hacer funcionar otras máquinas mecánicas.

Junto con el viento, el agua fue otro factor relevante para el movimiento de molinos y otro tipo de máquinas. Es así, que el siglo XX se ha convertido en la época de la energía hidroeléctrica a partir del movimiento y las corrientes del agua. El mundo se ha volcado hacia la construcción de grandes presas para generar electricidad. El impulso del agua depende del tamaño del caudal, la longitud y la altura para crear el flujo. Su primera aplicación fue en China hace más de 2000 años para triturar granos, romper minerales y otros procesos mecánicos simples. En el siglo XIX, la energía hidroeléctrica se utiliza principalmente para generar electricidad. A diferencia de las épocas preindustriales donde el uso de la energía renovable fue para abastecer pequeñas comunidades y actividades económicas de menor escala, en la actualidad las energías renovables demandan mayores requisitos en infraestructura para su difusión. Por tanto, en la discursiva internacional existe un interés para impulsar su participación en la matriz energética. Las manifestaciones del cambio climático vuelven insostenibles la forma de producción existente. El siguiente apartado explica el reconocimiento institucional de esta problemática y la importancia de la transición.

3.2 La urgencia de la transición energética

3.2.1 Los principales acuerdos en materia ambiental y el desarrollo sustentable

El químico mexicano Mario Molina y Franck Rowland (1974) reconocieron por primera vez el potencial de los gases fluorocarbonos y el CO₂ para agotar el ozono estratosférico. Esta

preocupación llevó a la comunidad internacional a la consolidación del Protocolo de Montreal en 1987. El temor sobre las sustancias que agotan la capa de ozono fue considerado un acuerdo histórico que busca la reducción de producción, consumo y emisiones mundiales. La principal lección de este acuerdo radica en la implementación de regulaciones nacionales para que la industria evite el uso de estos elementos, logrando una protección al ozono en la atmosfera que evita el ingreso de rayos ultravioleta y contiene el incremento de la temperatura planetaria.

En ese mismo año, la Comisión de Medio Ambiente de las Naciones Unidas (creada en 1983) publica el Informe Brundtland que resulta ser una revolución en cuanto a las perspectivas de largo plazo vinculadas a la salud de los ecosistemas. La particularidad de esta publicación es explorar la problemática ambiental vinculando el crecimiento económico y los principios de igualdad mencionando por primera vez el concepto del desarrollo sustentable como una dinámica donde se satisfacen las necesidades presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras.

El transcurso de la década de los 1990 representa una época de profunda movilización institucional. En 1990 sale a la luz el primer informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), organización de expertos conformado por especialistas y científicos para analizar causas y consecuencias del cambio climático creado en 1988, señalando de manera enfática la concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera a causa de las actividades humanas.

Estos alarmantes mensajes fueron punto central para la creación de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo de Río de Janeiro en 1992. Como señalan Hanley y Owen (2004) esta convención ha sido el sustento básico para guiar las acciones de cambio climático contra las CO_2 y promover el desarrollo sustentable. Resultado de las reuniones surgen órganos que permiten la evaluación y correcta implementación de los compromisos como la Conferencia de las Partes (COP) en funciones a partir de 1995.

Más tarde, debido a los pocos resultados de la estrategia de la convención de Río comenzó a negociarse un nuevo marco normativo y regulatorio; el Protocolo de Kioto en

diciembre de 1997. La arquitectura básica de este acuerdo busca la reducción de las ECO₂ de países desarrollados y en vías desarrollo dentro de un horizonte temporal. Para el periodo 2008-2012 se esperaba al menos la reducción del 5% de emisiones contaminantes en relación con su nivel de 1990 mientras para 2020 se esperaba al menos el 15, dejando a libre elección los mecanismos al interior de cada país para lograr la consumación de sus obligaciones.

Los mecanismos que se plantearon para alcanzar las metas excluían el uso de energía nuclear, optando por mejoras en los proyectos de energía renovable y eficiencia energética para el conjunto de países desarrollados. De acuerdo con Kim *et al.* (2020) el acuerdo permitió establecer cuatro mecanismos para garantizar buen desempeño de este: comercio de emisiones nacionales, impuestos a carbono, mecanismo de desarrollo tecnológico limpio e implementación conjunta entre países. En particular, se recalca la importancia de reducir las emisiones del listado señalado en el Anexo I del acuerdo concernientes al dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hexafluoruro de azufre, gases de la familia de los hidrofluorocarbonos y la familia de los hidrocarburos perfluorados.

Alguna de las herencias del Protocolo de Kioto que prevalen en los acuerdos posteriores contra el cambio climático es el interés acerca del desarrollo sustentable y la creación de mecanismos para la comercialización de permisos que permite vender la proporción de contaminación no utilizada usualmente por los países no desarrollados hacia los países industrializados. Radanne (2006) señala que George Bush se opuso a cualquier intento de regulación internacional, mientras Hovi *et al.* (2003) apuntan que la misma administración se benefició únicamente de los permisos de carbono negociables.

Debido a la falta de resultados en materia de ECO₂ llevó a que el 12 de diciembre de 2015, 196 países en el marco de Naciones Unidas contra el Cambio Climático firmaran el Acuerdo de París. Este nuevo acuerdo normativo radica en dos principios fundamentales: evitar el incremento de la temperatura planetaria más allá del rango de 1.5-2 grados Celsius y la descarbonización de la economía vía expansión de la matriz energética y promoción de energías renovables.

Chai *et al.* (2020) indica que la reunión COP21 durante 2015 conformada por 188 países fue el factor detonante para crear este acuerdo con el fin de restablecer y mejorar los

mecanismos de colaboración gubernamental. Mientras Dimitrov *et al.* (2019) señalan que el acuerdo es un logro excepcional a nivel institucional por reconfigurar el dinamismo de la política ambiental desde abajo, es decir, incluir la injerencia de las contribuciones de los gobiernos estatales al sistema nacional, al tiempo que Nieto *et al.* (2018) afirma que el espíritu de Acuerdo de París radica en cumplir con las ECO2 dentro de un marco eficiencia en la gobernanza de los recursos naturales.

El acuerdo establece objetivos de largo plazo en la reducción de emisiones vinculado a los siguientes elementos: impacto socioeconómico de la transición, gestión de la energía, sustitución de fuentes energéticas no renovables, rol de la tecnología y transferencia política, integración de la escala regional en la solución de conflictos energéticos, compensación de los impactos climáticos, igualdad en la transición, apoyo financiero para la creación de fondos que permitan cumplir las metas pactadas y proyectos de transición energética siguiendo el espíritu del protocolo de Kyoto en la creación de mecanismos de permisos de emisiones. A su vez, la preocupación medioambiental se coordina junto a los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por Naciones Unidas cuyo objetivo es la reducción de la pobreza y solución de conflictos dentro de un ambiente sano para el año 2030.

En fechas recientes ha tomado auge un nuevo esquema normativo que guie a la economía hacia los ODS y el Acuerdo de París. El nuevo pacto verde denominada Green New Deal toma relevancia internacional a raíz de la propuesta de la congresista estadounidense Alexandria Ocasio-Cortez. Evoca la idea keynesiana del Estado interventor durante épocas de depresión económica, añadiendo las aspiraciones para reducir de manera drástica las emisiones de efecto invernadero (Harris, 2019). Se plantea un mecanismo que genere cambios en la oferta y demanda agregada e impulsen la generación de empleos a través de las inversiones sociales. Este programa descansa sobre el paquete de reformas implementadas por Franklin Roosevelt durante la década de los años treinta del siglo pasado que permitió a la economía estadounidense salir de la crisis de 1929.

Bajo esta lógica, se busca la colaboración entre el Estado y sus instituciones para generar políticas en conjunto con la iniciativa privada para afrontar dos grandes problemas a nivel ecológico y social, reflejando de manera sutil la dinámica económica y sus

implicaciones sobre la sociedad, aunque no de la manera más apropiada. A este punto se retorna más adelante.

Dentro de sus principales características del paquete de acciones “verdes” se presentan las señaladas por Rosas (2021): I) Disminución de las emisiones de CO₂ en 45% para 2030 y 100% para 2050. II) Creación de empleos con altos salarios que garanticen prosperidad social. III). Modernización tecnológica sectorial que promueva el uso de energías renovables. IV) Demanda energética sostenible con base en la generación de energía eléctrica de fuentes limpias. V) Procesos económicos bajo un enfoque circular, que reduzca la cantidad de residuos y reutilice la mayor cantidad de insumos utilizados. VI) Promoción de políticas fiscales que distribuyan los impuestos al carbono hacia gasto público que beneficie económicamente a los sectores afectados. VII) Incentivos fiscales que promuevan el desarrollo tecnológico con miras a la mitigación y adaptación frente al cambio climático. VIII) Participación gubernamental en proyectos e infraestructura que permitan el tránsito de la matriz energética hacia el uso de energías renovables, así como edificios gubernamentales “cero carbono”. IX) Todo objetivo debe ir en sincronía con los principios establecidos en el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París.

3.2.2 La importancia de la transición sociotécnica

En el conjunto de respuestas frente a la crisis climática, la mayoría de los acuerdos internacionales coinciden que una medida para evitar las consecuencias adversas, o al menos aminorar los efectos, es la transición energética. Particularmente, a partir del Acuerdo de París aparece el término de transición vinculado a la descarbonización de la economía y la disminución de los combustibles fósiles en la matriz energética.

Es relevante precisar que desde el capítulo 2 de la tesis se hace hincapié sobre el contexto en que se asume la interacción de la sociedad. Es decir, la sociedad en su conjunto es parte de un complejo núcleo de interrelaciones entre el sistema económico, social y ambiental. Además, existen elementos históricos como la dependencia de la trayectoria que determinan el nivel de desarrollo tecnológico, al tiempo que existen factores que determinan en la escala micro, macro y meso, la respuesta creativa de las poblaciones frente al cambio climático.

El desarrollo de las transiciones energéticas muestra, entre otros elementos, la dificultad de encasillar el progreso de los combustibles fósiles a un aspecto puramente técnico donde la tecnología es el único factor que incide en cada transformación energética. Este antecedente y el marco epistemológico del trabajo impulsan la necesidad de analizar la transición energética más allá de un marco puramente técnico sino desde una perspectiva amplia.

Desde un análisis convencional, el cuadro 3.1 muestra los aspectos técnicos de la transición hacia el uso de fuentes renovables. Sin embargo, centra su interés únicamente en las características técnicas de cada fuente. Cada régimen energético se realiza dentro de un contexto histórico particular cuyas relaciones de poder, económicas, sociales y políticas son específicas en el cual cada acción tiene consecuencias positivas y negativas debido a todo se desenvuelve dentro de ámbitos culturales específicos, particularmente la forma de relacionarse la sociedad con la naturaleza y la forma de utilizarla.

Cuadro 3.2. Principales aplicaciones y desventajas de las energías renovables

Energía	Principal aplicación	Características	Daños ambientales	Daños sociales
<i>Eólica</i>	Turbinas eólicas	China es el líder mundial en energía eólica con el 35% de la capacidad acumulada de energía eólica. Otros países líderes a partir de 2018 incluyen EE. UU. (17 %), Alemania (10 %), Dinamarca (2 %), India (6 %), Brasil (2 %), Reino Unido (3 %), Italia (2 %). , Francia (3 %), Canadá (2 %) y España (4 %)	Afectaciones sobre las aves, contaminación del agua para funcionamiento de molino	Desplazamiento de comunidades, procesos de licitaciones poco claro, expropiación de tierra

<i>Solar</i>	Paneles solares	La capacidad instalada en 2016 superó la producción acumulada de los cinco años anteriores y un aumento del 45 por ciento de 2015 a 2016. El crecimiento en Asia representó alrededor de dos tercios de la capacidad adicional del mundo. Específicamente, China, Japón, India, Reino Unido y Estados Unidos representaron el 85 por ciento de las adiciones. China dominó el mercado de la energía solar fotovoltaica en la fabricación y el uso.	Falta de reciclaje de residuos, invasión de aves,	Expropiación de la tierra
<i>Hidro-eléctrica</i>	Presas	Brasil, China, Canadá y Estados Unidos se convirtieron en los mayores productores de energía hidroeléctrica	Cambian la dirección de los ríos, aumentan la erosión de las tierras, cambio del paisaje por las grandes obras de concreto, pérdida de hábitat principalmente especies acuáticas	Desbordamientos de ríos hacia las comunidades, desplazamiento de comunidades, intoxicación del agua potable
<i>Bioenergía</i>	Bio-combustible biogás, biomasa	La combinación de combustibles ya comprende alrededor del 10 % del uso de energía de vehículos livianos en USA, donde proviene principalmente del maíz y también del trigo. El etanol juega un papel más importante en Brasil, donde se produce a partir de caña de azúcar en granjas en la costa más oriental del país, cerca de la megaciudad de Sao Paulo	Acaparamiento de tierras para incrementar la creación de biocombustibles, sobreexplotación del agua, cambios del uso de suelo	Disputa por la tierra, surge incertidumbre respecto a la autonomía alimentaria
<i>Geotermia</i>	Plantas de vapor seco, vapor rápido y ciclo	Los sitios a lo largo del “anillo de fuego” del Pacífico u otros lugares cerca de áreas volcánicas activas ofrecen un potencial significativo para la generación de	La naturaleza de la actividad produce emisiones mortales de sulfuro de hidrógeno	Riesgo de las poblaciones debido a que proviene de volcanes

	binario.	electricidad. La energía geotérmica proporciona más del 15% de la electricidad en varios países, incluidos Islandia, Kenia, El Salvador, Costa Rica y Filipinas		
<i>Energía de las olas</i>	Motores hidráulicos	Es precisamente en Europa donde se lidera el desarrollo tecnológico de las energías marinas, con Escocia y España (País Vasco) a la cabeza, seguido de las instalaciones ubicadas en Irlanda, Suecia y Portugal. A escala mundial, también se están realizando proyectos en Estados Unidos y Canadá, así como en Chile o China, que avanza con algunas iniciativas interesantes.	Daño a las especies marinas en épocas de veda, contaminación del agua	Privatización de zonas de playa
<i>Energía mareomotriz</i>	Turbinas	Los países que actualmente tienen capacidad instalada para producir energía mareomotriz son: Corea del Sur, le sigue Francia, Canadá, Reino Unido y Noruega	Impacto sobre el paisaje, riesgo de derrames de líquidos corrosivos derivados de las turbinas	Interferencia con procesos de pesca
<i>Fuente: Elaboración propia con base en Zepf (2020), Penna (2020), Mulvaney (2020), Bleicher y Pehlken (2020)</i>				

En esta sintonía, el cuadro 3.2 amplía la presentación del cuadro 3.1 al mostrar las consecuencias negativas de cada tecnología renovable. Del cuadro destaca que cada cambio energético no sólo se enfrenta a restricciones de eficiencia técnica sino además genera impactos en el medio ambiente y sobre la sociedad.

El análisis que seguirá en los apartados consecuentes intenta reivindicar el análisis de las transiciones energéticas más allá de la evolución de las tecnologías. La realidad muestra que, más allá de la idea prevaleciente de los acuerdos internacionales, el cambio hacia un paradigma de menor impacto se confronta a límites sociales, ambientales, tecnológicos y energéticos. Por ello, el capítulo 2 representa la base analítica para entender la interacción de los diversos componentes que implica las actividades económicas sobre el ambiente,

además mostrando los determinantes que engendran la innovación.

Desde esta perspectiva, el término más apropiado para analizar la transformación de la matriz energética es entender la transición energética como la transición sociotécnica. Desde la perspectiva de Upham *et al.* (2019) en la literatura dominante acerca de la transición existe una obsesión sobre la tecnología y los costos de implementación. De esta forma, el paradigma de las transiciones sociotécnicas permite comprender el desarrollo de la ciencia, la industria, el mercado, la política y la cultura como un todo que se relaciona dentro de un sistema de interacciones. Además, siguiendo este mismo trabajo, este marco permite incorporar los aspectos psicológicos y sociales permite comprender los impactos de la transición sobre los individuos y poblaciones.

Este enfoque incorpora los elementos físicos y tangibles de la transición y va más allá al integrar la visión de los individuos sobre cómo transitar hacia otra situación. En lugar de asumir el conocimiento codificado de las tecnologías, Valentine *et al.* (2019) apuntan la importancia de incluir entidades físicas (tecnologías físicas) y aspectos intangibles (tecnologías sociales) como son los elementos institucionales, el conocimiento formal e informal, hábitos de consumo y sobre todo las dimensiones cognitivas.

La perspectiva histórica en la transición es fundamental. Como se mostró al inicio del capítulo, no es posible entender la urgencia climática sin el recorrido histórico de las sociedades. Esta postura es defendida por Newell (2021) para quien los aspectos ecológicos deben dar cuenta de dimensión histórica si realmente quiere comprenderse y modelar el vínculo entre la sociedad y el planeta.

Como se enfatizó en el capítulo 2, el problema del cambio climático se enfrenta a los límites cognitivos del ser humano para comprender un fenómeno cuya especificidad es principalmente intangible. Por lo cual, como se propuso, no es posible entender la dimensión ambiental si no se reconoce al ser humano como poseedor de reglas cognitivas, capacidades de aprendizajes y creador de hábitos determinados por la estructura social e institucional en que nace y se desarrolla. La transición socioeconómica rescata este principio y busca incorporar los elementos del comportamiento humano que establece la interacción de las sociedades y retroalimentaciones, tal como atañen Upham *et al.* (2019).

En un carácter meramente técnico, la transición parece un fenómeno aplica a un conjunto de agentes homogéneos sin capacidad de negociar el cambio cuyo resultado garantiza una transición exitosa. El enfoque propuesto modifica esta perspectiva y reconoce el impacto diferenciado que tiene un plan de transición, argumentando la existencia de resistencias al interior y el surgimiento de grupos específicos que diseñan sus respuestas locales. Así, Labussière y Nadaï (2018) argumentan que la visión socioeconómica permite integrar el ambiente productivo, institucional y diversidad como elementos a considerar en el éxito de la implementación y desempeño de la tecnología.

El movimiento hacia una economía de menor impacto ambiental se desenvuelve en un contexto institucional particular y prácticas productivas específicas. Los individuos y sociedades están influidos por el conjunto de reglas. Frente a un entorno dinámico que implica la respuesta frente al cambio climático las instituciones proporcionan elementos que modifican el comportamiento y la respuesta conjunta del sistema. Por ello, Mulvaney (2020) señala las ventajas del enfoque socioeconómica para introducir los aspectos institucionales, límites sociales y entorno tecnológico que incide en la transición.

Teniendo en cuenta las instancias institucionales, Peake (2021) insiste en la importancia de la cultura energética. Ésta definida como el conjunto de prácticas y hábitos que determina la forma en que interactúan los individuos y sociedades con el entorno natural al tiempo que determina el valor que tiene la naturaleza para las comunidades. La cultura se convierte en un factor relevante para aceptar o rechazar nuevas pautas de consumo o comportamiento.

De manera resumida, el cuadro # muestra los rasgos principales que diferencian la transición energética de la visión sociotécnica, clasificando los puntos más relevantes y que son coincidentes con las categorías analíticas del capítulo 2 y que serán fundamentales para el análisis de los siguientes apartados.

Cuadro 3.3. Diferencias entre la transición técnica vs transición socioeconómica

Aspectos	Transición técnica	Transición sociotécnica
<i>Tecnología</i>	Centrado en el desarrollo de las tecnologías físicas. Se asume un resultado positivo	Integra las tecnologías sociales y físicas desarrolladas en una sociedad determinada. La tecnología no garantiza una transición exitosa pues existe un entorno productivo, institucional y fuerzas sociales que son participes de la transición
<i>Principio evolutivo</i>	Tecnología se desarrollan de manera exógena y se implementan en el sistema productivo	Tecnología son de carácter endógeno pues resultan de las necesidades particulares de cada sociedad
<i>Escala analítica</i>	Macroeconómica	Micro, meso y macro
<i>Actores</i>	Sector empresarial y Estado como facilitador	Comunidades, empresarios, Estado y organizaciones
<i>Barreras</i>	Financiamiento, disponibilidad tecnológica	Resistencia ciudadana frente a proyectos adversos a su entorno, cultura energética
<i>Principio evolutivo</i>	El sector económico es el centro de la evolución del sistema en su conjunto	Cada sistema tiene una dinámica propia. La tecnología es sujeta al principio de selección, replicación y amplificación
<i>Conducta de los actores</i>	Minimizador de costos y residuos a fin de garantizar rentabilidad	Sujetos intentan adecuar las tecnologías físicas y sociales sujeto a la función objetivo
<i>Dimensiones</i>	Física y tecnológicas	Físicas, tecnológicas, cualitativas, culturales, simbolismos, aspiraciones
<i>Aspecto institucional</i>	Instituciones como reguladores	Instituciones regulan e influyen sobre el comportamiento de los actores

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 El carácter entrópico de la transición

De la misma manera en que las transiciones energéticas se vinculan a la vulnerabilidad y justicia, este proceso se vincula de manera inherente a la naturaleza en términos energéticos. En el capítulo 1 y más ampliamente en el capítulo 2, se ha hecho hincapié al impacto entrópico de las actividades económicas. De manera general, la entropía se refiere a la pérdida de energía disponible en el sistema después de cualquier acción humana o

económica. En consecuencia, el uso de fuentes primarias para la generación de mercancías produce que el resto de los sistemas dispongan de menor cantidad de fuentes energéticas disponibles para el desarrollo de las acciones humanas.

El uso de combustibles y fuentes energéticas ha definido el desarrollo de las estructuras sociales a lo largo de la historia. Así, la transición energética hacia las fuentes renovables resulta inevitablemente en un complejo proceso sobre la disponibilidad energética. De acuerdo con Smil (2017) la historia humana puede explicarse como la lucha por la entropía. Georgescu-Roegen (1971) reafirma, muchos años antes, esta idea, al señalar que el aspecto dinámico de las sociedades ha sido la consolidación de estructuras entrópicas.

El cambio de un esquema de alto consumo energético basado en fuentes fósiles ha dejado a su paso un impacto entrópico sin precedentes. En este sentido, la disminución de reservas energéticas que permiten el desarrollo social pone entre dicho el desarrollo de la sociedad en su conjunto.

Además de vincular la entropía al proceso de pérdida energética, la entropía puede considerarse como un indicador del grado de complejidad dentro de un sistema (véase capítulo 2). Haciendo uso de ambas concepciones, en el régimen basado en fuentes fósiles incrementó la entropía en términos energéticos y reduce a una pérdida de complejidad del sistema y un mayor nivel de caos.

El uso de carbón y petróleo como principales elementos energéticos de las sociedades industriales ha producido la conversión de fuentes primarias en CO_2 , a su vez, este cambio cualitativo genera que el resto de la sociedad no pueda utilizar nuevamente dichas fuentes, más aún, la transformación de sus aspectos físicos se convierta en un problema que ha llevado al sistema a incrementar su nivel de caos expresado en contaminación y daño ecológico irreversible.

Por otro lado, en términos de la dinámica sociotécnica, el sistema redujo su complejidad al utilizar de manera mayoritaria tecnologías que dependan de estas fuentes, implementar una estructura de transporte que privilegio los combustibles, despliegue industrial de uso intensivo en fósiles y marcos institucionales que impulsan el gasto calórico proveniente de dichas fuentes. En consecuencia, el mundo bajo el régimen de energías fósiles

está condenado a su muerte entrópica en términos energéticos, de disminución de complejidad y aumento del caos.

Es la importancia de la entropía por lo cual la transición hacia las energías renovables debe integrar estas perspectivas en el desempeño del sistema sociotécnico y socioeconómico. El despliegue tecnológico debe estar vinculado a la disminución de entropía en términos de la eficiencia energética de cada proceso. En este punto es donde la Ecología Industrial insiste en la implementación y construcción de métodos que reduzcan el nivel de sinergias desfavorables contra los ecosistemas.

Un riesgo que se corre al entender la transición en términos estrictamente tecnológicos es la paradoja verde. De acuerdo con Sinn (2012) bajo la idea de tecnologías renovables, la producción de mercancías tiene incentivos a incrementar debido al mensaje de sustentabilidad que genera entre los consumidores. De tal forma, la disminución de entropía que pueda generar el progreso tecnológico se ve contrarrestado con el incremento en el consumo de unidades de mercancía. En términos energéticos, el nivel entrópico en el sistema general incrementa por el efecto rebote de la tecnología, tal como señaló Jevons en 1876, provocando que la sociedad siga en la misma tendencia hacia la muerte entrópica.

El camino de la transición energética debe considerar los efectos adversos que puede generar la tecnología y que conduce a la sociedad hacia una paradoja verde. Por ello, se reafirma la importancia de un marco más amplio como el sociotécnico y socioeconómico para comprender la dinámica entrópica de cada decisión.

En materia de complejidad, las energías renovables tienen el potencial de incrementar la variedad de recursos físicos y organizativos de la sociedad para disminuir el impacto entrópico, al mismo tiempo que el caos disminuye al desacelerar la tasa de deterioro ambiental. La entropía se vuelve en el indicador vital para saber si realmente una transición es sustentable, además refleja las disputas y acuerdos entre los actores para beneficiarse de los servicios de energía limpia. Este elemento se intenta capturar en las simulaciones empíricas del capítulo 4 y 5.

3.3 El papel del sector eléctrico en la transición: historia y actualidad

3.3.1 La energía eléctrica. ¿fuente secundaria de energía?

En el debate acerca de la importancia de la electricidad para las sociedades modernas existe una profunda controversia sobre el papel de la electricidad. Autores como Frech (2017) señala que la energía eléctrica es una fuente secundaria de poder debido a que se requiere una fuente primaria para su generación y posteriormente es necesario impulsar una maquinaria para obtenerla. En cambio, Meyer (1971) afirma que la era eléctrica representa un suceso tan relevante como lo fue la era de la piedra, de bronce o hierro.

A pesar de que su proliferación doméstica e industrial en el mundo comenzó hacia finales del siglo XIX y comienzos del XX, su descubrimiento y primeros procesos de experimentación puede remontarse muchas décadas atrás. Erenoğlu *et al.* (2019) narran los primeros contactos culturales con los fenómenos eléctricos. La antigua cultura egipcia en el año 2750 A.C. consideraba las tormentas eléctricas como fuentes protectoras de los ríos. antigua Grecia.

Quizá el caso de mayor difusión y documentación acerca de la electricidad durante la antigüedad fue el descubrimiento de Tales de Mileto quien alrededor del año 600 A.C. se percató que al frotar un trozo de ámbar diversos materiales se atraían hacia el material. Este suceso es el descubrimiento pionero que sirvió para el desarrollo de la industria del siglo XVII (Smil, 2019). De acuerdo con Koch (2010) tanto Platón y Aristóteles es posible encontrar esta referencia, aunque no hay indicios de que realmente fuera Tales. Al igual que los egipcios, en la cultura griega existía una cosmovisión acerca de los fenómenos estáticos al señalar al ámbar como atractor de almas.

Fue hasta el siglo XVII donde comenzó a retomarse el interés por los sucesos eléctricos gracias, en gran medida, a los antecedentes con el ámbar⁴⁴. En el año 1600 el considerado padre de la electricidad, William Gilbert, publicó su obra magna haciendo referencia a las propiedades del ámbar.

⁴⁴ Si bien los experimentos comenzaron a difundirse en el siglo XVII, el mismo Koch (2010) narra un antecedente en 1546 donde el poeta, médico y filósofo italiano Girolamo Fracastoro mostró que al frotar el ámbar es posible atraer no sólo elementos ligeros como el polvo sino también metales como la plata.

Es el siglo XVIII donde se da una revolución de experimentos y descubrimientos sin precedentes. William Wall en 1708 publica sus descubrimientos sobre las chispas que emiten los cuerpos electrificados, en particular, de un trozo de ambar frotado. Asimismo, analiza la naturaleza eléctrica del trueno y relámpago (Poveda, 2003). La naturaleza de los materiales conductores de electricidad fue analizada por Stephen Gray en 1729 quien descubrió que la electricidad podía conducirse por la tierra, al mismo tiempo que se percató que dos objetos podían compartir energía eléctrica siempre y cuando existiera un alambre de metal entre ambos, es decir que los metales conducen la electricidad.

El experimento más celebre fue el realizado por Benjamin Franklin quien en 1752 diseñó un cometa con base de metal atando una punta metálica a cada extremo, una en la punta del cometa y la otra en la punta de la cinta donde se sujeta. Al hacerlo volar en medio de una tormenta se percató que la punta inferior recibió una descarga eléctrica, demostrando que las nubes están cargadas de electricidad y los rayos son un fenómeno eléctrico, dando pie a la invención del pararrayo⁴⁵.

La llegada de la Revolución Industrial condujo a una serie de cambios acelerados y drásticos en las innovaciones eléctricas. Comenzando en 1800 con la invención de la pila gracias al físico italiano Alessandro Volta⁴⁶, posteriormente en 1819 los experimentos de Hans Christian Ørsted demostraron la relación entre la electricidad y el magnetismo gracias a la desviación de una aguja magnética por su cercanía a la corriente eléctrica. Mientras,

⁴⁵ Si bien “el experimento de Philadelphia” de Franklin fue un parteaguas en la historia de la electricidad al demostrar que el metal es un transmisor de la energía, Kryzhanovsky (1989) destaca los experimentos previos acerca de las propiedades de materiales aislantes y conductores. Entre ellos destacan Georg Matthias Bose (1744) al demostrar las capacidades de la resina y Jean-Antoine Nollet (1746) hace lo mismo con la porcelana. Vilanueva (1997) destaca los aportes del físico francés para la difusión de la electricidad en Europa

⁴⁶ . Quizá la mayor controversia acerca de las fuentes de electricidad y conductividad se dio a finales del siglo XVIII (1791) cuando Luigi Galvani conectó un arco de metal al cuerpo de una rana. Al observar que las patas del cuerpo se movían de manera similar a un ejemplar vivo, concluyó que había descubierto la fuente animal de energía. Frente a ese resultado, Alessandro Volta se contrapuso al afirmar que la fuente de energía no provenía del cuerpo sino de una fuente externa. Este experimento llevó al mismo Volta en 1800 a descubrir, en el mismo experimento de la rana, que, a pesar de existir diferencias de metales entre ambos extremos del arco del metal en el cuerpo de la rana, existía contracciones. Dicha acción llevó a construir al científico italiano el precursor de las pilas actuales, la pila volta. Es decir, dos metales distintos en el extremo conectados por un alambre permitían conservar una carga constante de electricidad.

Michael Faraday en 1831 descubrió una relación inversa entre la aguja mecánica y un cable, produciendo la aparición de electricidad. Ambos experimentos forman parte en la fundación de la electroquímica, elementos básicos para el desarrollo de los motores eléctricos y generadores de corriente (Moráguez, 2006).

El cambio radical en la electricidad fue a raíz del trabajo de Thomas Alva Edison. Sus contribuciones se concentraron principalmente en el problema de la iluminación. En 1879 creó la primera lámpara comercial para la iluminación en el hogar con base en los aportes de Volta. Durante 1880 diseñó la primera planta de generación, en 1881 registró el primer sistema comercial de electricidad en la ciudad de Londres y en 1882 instala su sistema eléctrico en la Ciudad de New York. Con estos logros Edison se convierte en el primer científico capaz de diseñar el primer sistema completo, desde la generación, transmisión, distribución y conversión final para los hogares (Frech, 2019).

El sistema eléctrico de corriente directa, a pesar de su potencialidad, tenía una serie de problemas técnicos. De acuerdo con Defeuilley (2019) la transmisión de la corriente directa de baja tensión hacia los hogares únicamente era posible en tramos cortos exigiendo una mayor cantidad de generadores en tramos cortos. En cambio, la electricidad de alta tensión no era convertible a baja y exigía dínamos de gran tamaño, de esta manera, la distribución de esta corriente necesitaba de muchos generadores pequeños.

Frente a estos límites aparece Nikola Tesla con la creación de un sistema eléctrico de corriente alterna. Reynolds y Bernstein (1978) consideran este suceso como la guerra de las corrientes. Siguiendo a los autores, el esquema de Tesla antecedió a Edison, sin embargo, no existían los transformadores adecuados. Fueron los transformadores creados por Staley en 1886 quien permitió el desarrollo de un circuito de alto y bajo voltaje, resolviendo el problema de transformación de tensiones de Edison, además ofrecía una potencia de 1000 vatios en lugar de 240 ofrecidos por Edison.

Este tipo de sistemas fue desarrollado por la empresa Westinghouse convirtiéndose

en una confrontación directa contra el brillante Edison⁴⁷. El esquema de corriente alterna permitía una mayor distancia de transmisión, el diseño de centrales eléctricas más grandes que utilizara con mayor eficiencia el combustible y conectar en un mismo esquema de distribución a los clientes domésticos e industriales (Defeuilley, 2019).

La visión de la corriente alterna triunfó y se consideró la derrota de Edison en la industria. A pesar de ello, según Gerber *et al.* (2017) a últimas fechas la corriente continua va ganando terreno debido al crecimiento de las instalaciones fotovoltaicas, la aparición de baterías en el sector de la construcción, en el campo de la electrónica, los motores con variadores de frecuencia y la iluminación con diodos emisores de luz conocida como LED.

3.3.2 Primera etapa: dependencia de los fósiles

La difusión del esquema eléctrico basado en la corriente alterna produjeron cambios radicales nunca antes visto para los sectores económicos del mundo. En un interesante libro, el grupo Captivating History (2020) enfatiza en el desarrollo tecnológico del sector eléctrico como pilar fundamental para la interconexión de las familias, el desarrollo de la naciente industria y la maduración de la revolución industrial transformando radicalmente la noción del crecimiento asociado al despliegue eléctrico⁴⁸. En la misma sintonía, Thierry (1986) narra el tránsito de la agricultura en Europa gracias al desarrollo de la electricidad, convirtiéndose en un espacio dinámico y floreciente.

Además del desarrollo industrial, la electricidad transformó la realidad de las sociedades. Frech (2019) ofrece un panorama amplio al señalar que la electricidad de amplia escala se consideró moderna, progresista y como medida de avance cultural al eliminar de los hogares las chimeneas para la calefacción, las velas producidas con grasas animales o las lámparas de gas. Como se apuntó en los primeros apartados, el humo al interior de los hogares era considerado antihigiénico

Si bien la electricidad fue un símbolo del progreso y se consideró una fuente limpia

⁴⁷ De acuerdo con Smil (2010) Edison entre 1880 y 1882 Edison obtuvo (además de casi 90 patentes para luces incandescentes mejoradas) 60 patentes para dínamos eléctricos y su regulación, 14 patentes para sistemas de iluminación eléctrica, 12 patentes para transmisión de electricidad y 10 patentes para medidores y motores eléctrico. Mientras Erenoğlu (2019) registra que durante 84 años Edison registró 1883 patentes.

⁴⁸ Al respecto véase Rahman (2020) y Seyi Saint *et al.* (2020).

de energía, la realidad era distinta. Siguiendo al mismo autor, el desarrollo tecnológico únicamente logró expulsar de los hogares el proceso contaminante, pero eso no evitó que miles y millones de toneladas de carbón fueran arrojadas a la atmósfera, tampoco los incendios provocados por velas ni mucho menos resolvió el problema del humo industrial en las ciudades.

Las primeras plantas de electricidad tuvieron como principal fuente energética el carbón. Smil (2010) apunta que, si bien a finales del siglo XIX se construyeron los primeros proyectos hidroeléctricos de alta capacidad, principalmente la estación de las Cataratas del Niágara inaugurada en 1895 fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando empezó a desarrollarse un mercado internacional de electricidad que incorporara nuevas tecnologías al sector. El desarrollo de generadores se realizó gracias a las reducciones de precios en los generadores y logró en 1949 la construcción del primer generador de alta potencia (Central Electricity Generating Board, 1971).

Como se ha señalado, el siglo XIX y XX se caracterizan por el uso de combustibles fósiles como fuentes primarias en el funcionamiento de la industria. La demanda de iluminación en las ciudades condujo hacia la creación de sistemas públicos de electricidad. De acuerdo con Boyce (2001) el siglo XX vio el despliegue de sistemas públicos de electricidad comandados por el gobierno encargado de la generación, transmisión y distribución alimentados de carbón. Mientras, a partir de 1980, Reino Unido lideró un esquema de privatización donde los productores y consumidores comerciaran libremente la fuente de energía preferible, convirtiendo la electricidad en una mercancía.

En el cuadro 3.4 se muestra las principales tecnologías desarrolladas a nivel internacional y que siguen siendo parte del esquema de producción eléctrico.

Cuadro 3.4. Tecnologías para la generación de electricidad basadas en insumos fósiles

<i>Tipo de central</i>	<i>Insumo energético primario</i>	<i>Descripción del proceso</i>
Termoeléctricas	Combustible a base de carbón, gas natural y derivados de petróleo	Conversión poder calórico del combustible en energía térmica.
Turbinas de gas	Gas natural	Compresión en turbina de gases de combustión a elevadas temperaturas

Vapor	Gas natural	Utilización de emisiones de otros procesos químicos
Ciclo combinado	Gas natural y vapor de agua	Combinación de unidades de turbinas de gas y vapor. Utilizan el calor residual del motor primario para la producción de vapor, y en consecuencia, el vapor se utiliza en una turbina de vapor para la producción de energía adicional
Combustión interna	Diesel	Principios de motores de combustión interna para generar electricidad
Carboeléctricas	Combustóleo, gas natural o carbón	Conversión del poder calórico del combustible en energía térmica.
Cogeneración	Energía calorífica	Generación de dos o más formas de energía a partir de una sola planta. Normalmente se utiliza para generar electricidad y también se utiliza el vapor para otro proceso
Nucleoeléctricas	Energía nuclear	Conversión energía calorífica en mecánica

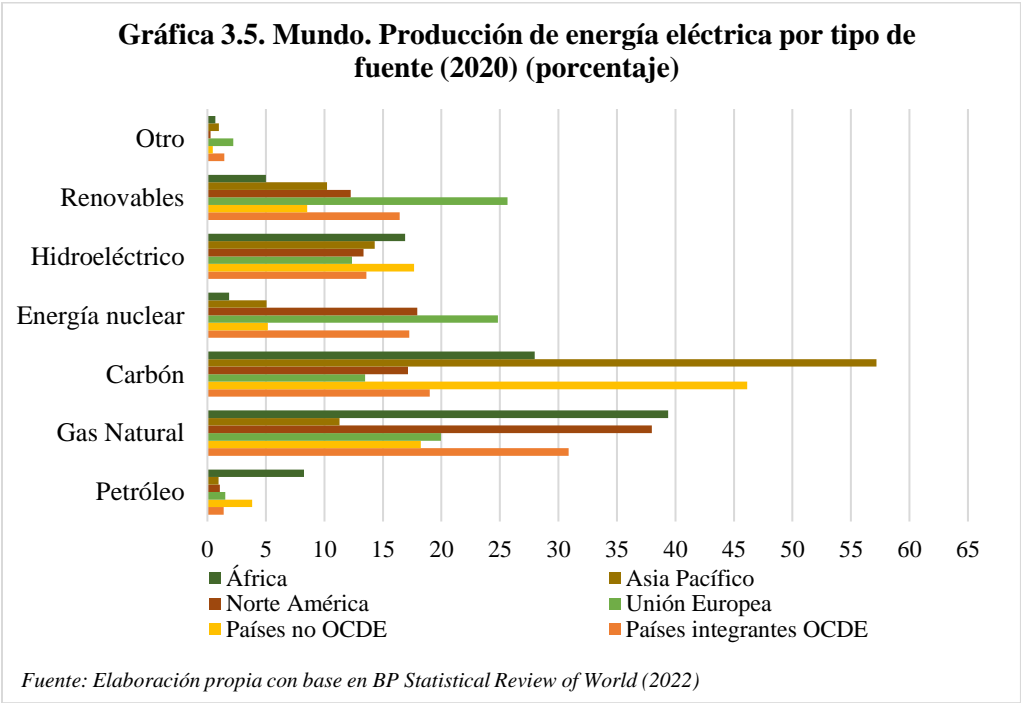
Fuente: Elaboración propia con base en Boyce (2001) y Anuarios de Sistemas de Información Eléctrica de México (2019, 2020)

El tránsito del sector eléctrico demuestra una dependencia grande de tecnologías que hacen uso de carbón. A partir de 1950, la disponibilidad de petróleo y de gas llevaron al desarrollo de turbinas adecuadas para estos combustibles incrementando su eficiencia. En efecto, las turbinas y motores con base en carbón y diésel tienen una eficiencia entre 30% y 45% respecto a los insumos (Raja *et al.* 2006) Dicho de otro modo, más de la mitad de energía se desperdicia.

Con el objetivo de incrementar la eficiencia, la industria se volcó hacia la explotación del gas, la construcción de turbinas y motores en torno a esta fuente energética. Siguiendo a Raja y Srivastava, (2006), las principales aplicaciones se dieron en las plantas de cogeneración eléctrica y ciclo combinado. A diferencia del resto de turbinas, la eficiencia de una turbina de gas aplicado en estas centrales oscila entre 70% y 75%.

A pesar de las mejoras técnicas para incrementar la eficiencia en el consumo de insumos fósiles, el sector eléctrico es de los mayores contribuyentes a las emisiones de CO₂. Como se muestra en la gráfica 3.5, para el año 2020 en promedio el 30% de la electricidad proviene del carbón, el 26% de gas natural. En materia de fuentes fósiles África utiliza el 28 % con carbón mientras que para la región Asia Pacífico es el 57%, siendo el más alto del mundo.

En general, los países integrantes de la OCDE se ubican en el tránsito hacia energías de menor impacto como el gas cuya proporción es del 31% de la electricidad generada. La diferencia es relevante respecto al grupo no integrante de la OCDE donde el carbón domina la generación de electricidad con el 46.1%. Finalmente, América del Norte (Canadá, Estados Unidos y México) la producción eléctrica es dominada por el gas natural (38%), el carbón representa el 17%, la energía nuclear el 17.9% (la segunda proporción más alta en el mundo después de Europa), mientras la hidroeléctrica y renovables el 13.4% y 12.2% respectivamente.



3.3.3 Segunda etapa: La tendencia internacional hacia las energías renovables

La liberalización de los mercados internacionales y la urgencia por incorporar fuentes fósiles de menor impacto ambiental han llevado a la industria eléctrica a integrar de manera industrial y masiva energías cuya presencia ha acompañado a la humanidad a lo largo de los siglos: el agua, el viento, el sol y la geotermia. El cuadro 3.5 muestra de manera general los 4 tipos de plantas de generación eléctrica que forman parte de las energías renovables y una breve descripción de sus aspectos técnicos.

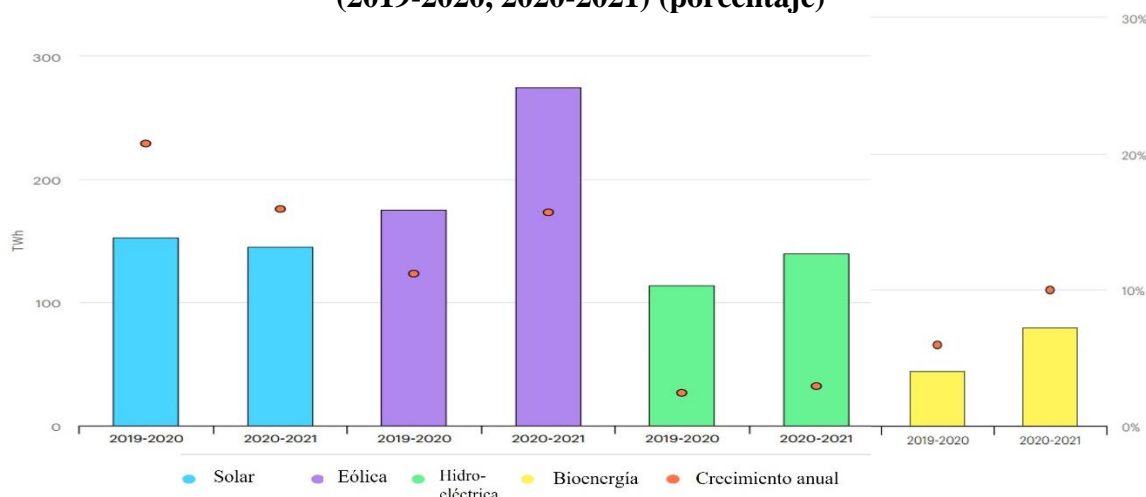
Cuadro 3.5. Tecnologías para la generación de electricidad basadas en energías renovables

<i>Tipo de central</i>	<i>Insumo energético primario</i>	<i>Descripción del proceso</i>
Hidroeléctrica	Energía potencial de las masas de agua y lagos	Convierte la energía potencial en mecánica a través de turbinas o ruedas hidroeléctricas
Geotérmica	Proveniente del núcleo de la tierra	Extracción del vapor del suelo para convertirlo en energía mecánica
Eólica (sobre tierra y fuera de tierra)	Viento	Conversión de la energía del viento mediante aeroturbina
Fotovoltaico	Radiación solar	Conducción de la energía solar a través de semiconductores

Fuente: Elaboración propia con base en Boyce (2001) y Anuarios de Sistemas de Información Eléctrica de México (2019, 2020)

A pesar del dominio de las energías renovables, en el contexto internacional la generación eléctrica limpia gana terreno. Como se apunta en la gráfica 3.6, la región que mayores avances en materia de energía renovable es Europa con cerca del 26 % de electricidad limpia. Respecto a nivel internacional sólo el 13 % de la electricidad corresponde a renovables (excluyendo la energía hidroeléctrica cuya proporción es del 14.7%), siendo África la región con menor desarrollo con tan sólo el 5% de energía eléctrica renovable y 17% proveniente de la hidroeléctrica.

Gráfica 3.6. Mundo. Incremento de la producción eléctrica renovable (2019-2020, 2020-2021) (porcentaje)



Fuente: AIE (2022)

A nivel mundial la producción de energía eléctrica proveniente de la tecnología fue la de mayor incrementó, representando cerca del 30% del total de electricidad limpia. En segundo lugar, se ubica la energía solar con el 14% mostrando una ligera disminución en 2021 respecto al 2020. En tercera posición la tecnología hidroeléctrica se encuentra al mismo nivel que el incremento del sector solar, pero tiene una tasa de crecimiento anual menor. De manera tendencial, el porcentaje de electricidad cuya fuente energética es la biomasa se sitúa con un 7%, son embargo muestra una tasa de crecimiento ascendente respecto al periodo 2019-2020.

Para entender la dinámica y difusión de las nuevas plantas generadoras es necesario detenerse en algunos factores claves. Entre ellos destacan los costos de instalación, el impulso de la innovación y cambio tecnológico medido en patentes y en gasto de I+D más el crecimiento de la capacidad instalada. A continuación, se realiza una descripción actual de dichos elementos.

3.4 La tendencia internacional hacia las energías renovables

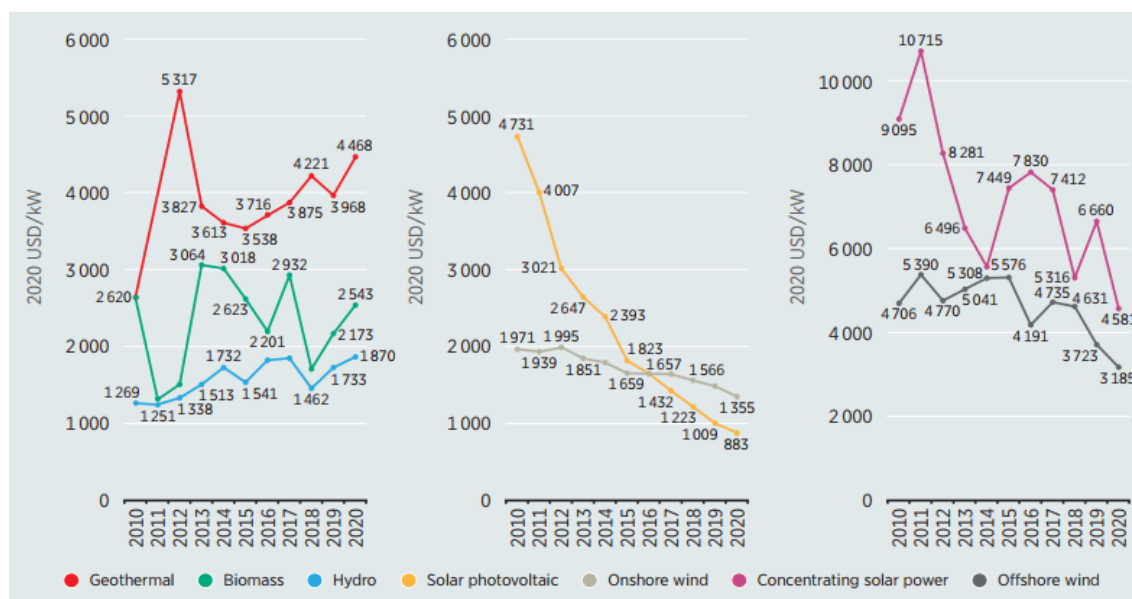
3.4.1 Costos

De manera general, los costos de una central eléctrica se desglosan en 4 elementos puntuales: costos de capital inicial, costos de combustibles, costos de operación y costo de desmantelamiento (Westwick, 2007). Gracias a la información proporcionada por la International Renewable Energy Agency (IRENA), en su informe *Renewable Power Generation Costs in 2020*, la gráfica # muestra la trayectoria de los costos de las tecnologías eléctricas renovables más representativas durante los años de 2010-2020.

En la gráfica 3.7 destaca el incremento del precio de las tecnologías geotérmica, biomasa e hidroeléctrica desde el año 2018. Respecto a la energía hidroeléctrica se registró un incremento del 10% para 2020 y una disminución del 16% respecto al 2010. Entre las hipótesis destaca el desarrollo de este tipo de proyectos en el mundo (principalmente en países en vías de desarrollo). En materia de electricidad generada por geotermia, el año 2020 fue el segundo pico más alto durante el periodo siendo 70% más alto que en 2010. De acuerdo con el informe, el precio de la tecnología biomasa es más oscilante debido a la diversidad de

tecnologías que se requieren para procesar cada fuente bioenergética, principales países que influyen son China, Europa y Estados Unidos.

Gráfica 3.7. Costos de instalación promedios por tecnología renovables (2010-2020)



Fuente: IRENA (2021)

Entre las tecnologías, la solar fotovoltaica y eólica⁴⁹ han mostrado las más grandes caídas de precios. La primera ha caído entre 77% y 88% durante el periodo 2010-2020 mientras que la segunda ha visto caer sus precios en 56% en el mismo periodo. De acuerdo con Lantz *et al.*, (2020), los costos de operación, las economías de escala y el esquema de subsidios en diversos países han impulsado el interés entre los productores y por ende disminuyan sus costos.

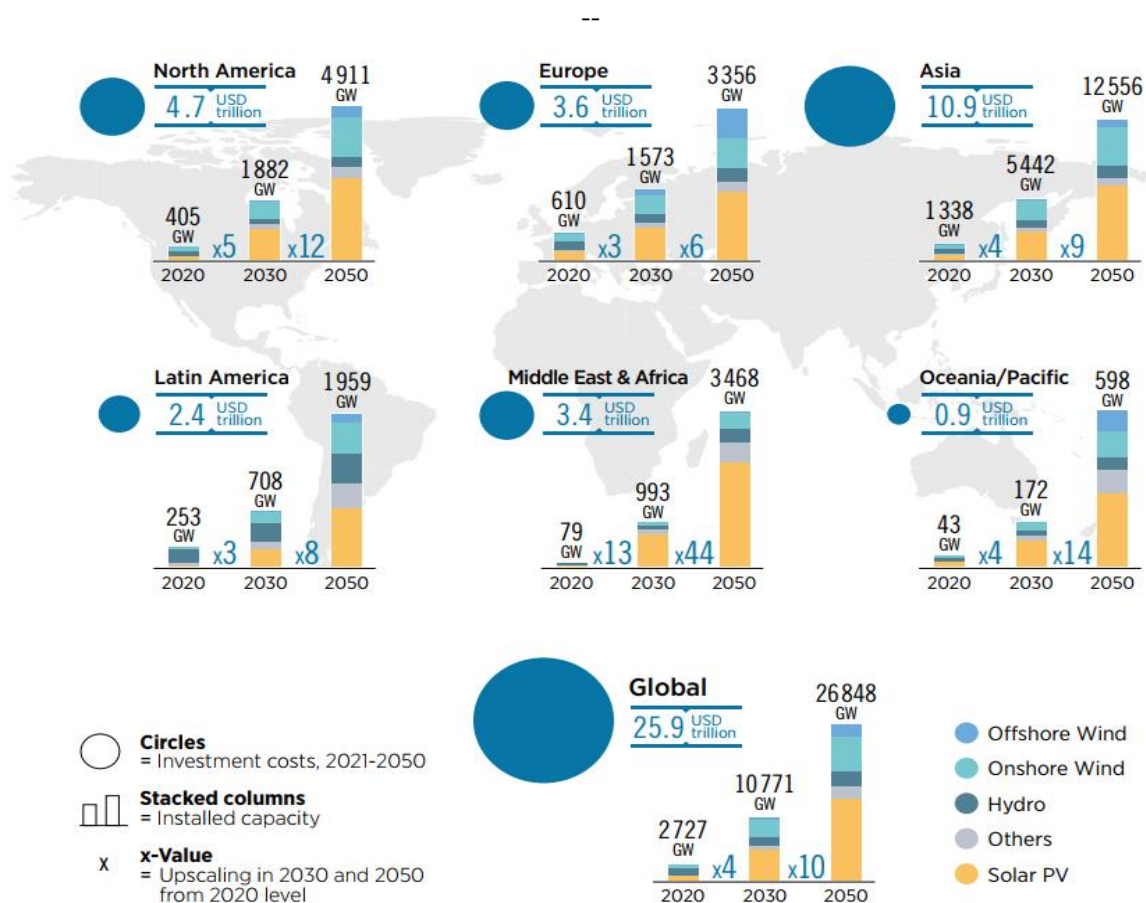
3.4.2 Capacidad instalada

En otro interesante informe de IRENA (2022) titulado *World Energy Transitions Outlook 2022*, se describe en la figura 2.2 de manera apropiada los esfuerzos realizados a nivel continental tanto en materia de capacidad instalada en términos físicos y financieros. De manera general, Asia es quien liderea en capacidad instalada seguido, casi en 50% menos por Europa. En un grupo compacto se encuentra Norte América y Latinoamérica, seguido en un tercer grupo por el Medio Este, África y Oceanía. En termino de inversiones, se espera un

⁴⁹ El análisis de IRENA (2021) clasifica la energía eólica en onshore (sobre tierra) y offshore (en el mar)

compromiso similar a la tendencia actual de su capacidad instaladas. En total, para el año 2050 se espera que el mundo se tenga instalados 26,848 Giga Watts de energía eléctrica renovable y logre un gasto cercano a los 26 mil millones de dólares para alcanzar la meta.

Figura 3.2. Capacidad instalada actual (2020) y perspectivas (2050)



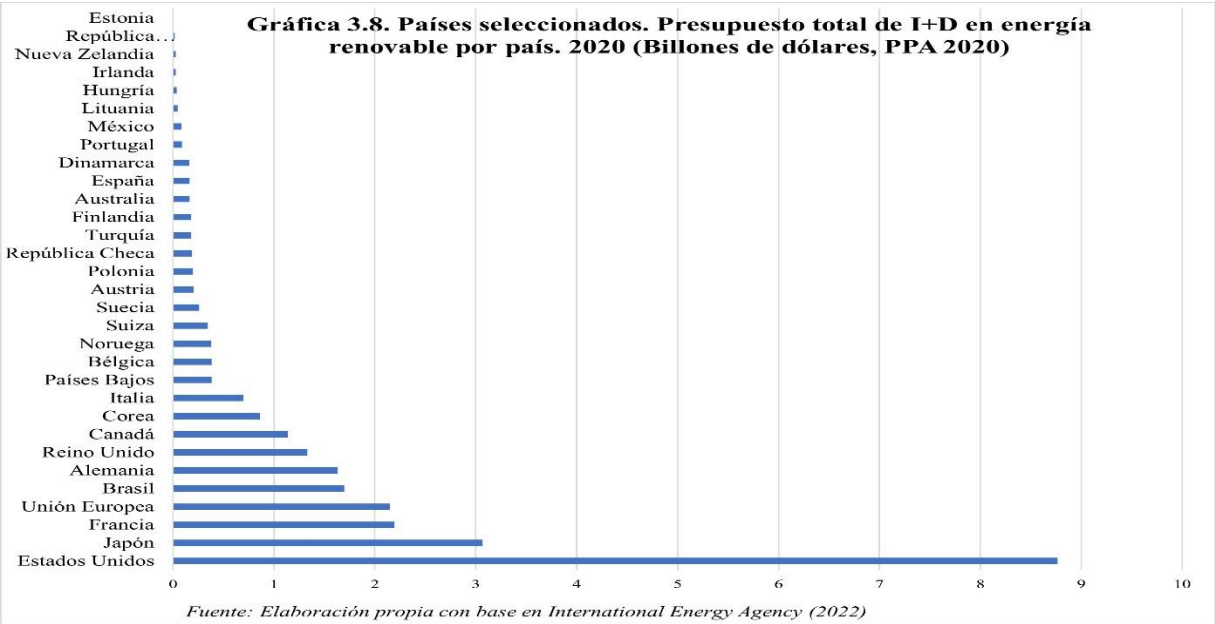
Fuente: IRENA (2021)

3.4.3 Difusión de la innovación: gasto en I+D

En el actual debate acerca de la transición energética existe un interés relevante acerca del papel de la política de innovación (Conchado, 2017). Como ya se explicó en el capítulo 2, existen grandes diferencias entre la forma de conceptualizar la innovación desde el enfoque neoclásico y el enfoque evolucionista. Sin embargo, en el campo de las estadísticas se recurre a indicadores que son utilizados en ambos enfoques para dar cuenta del proceso de

innovación, entre ellos se encuentran las patentes y el gasto en innovación y desarrollo [I+D] (Griliches, 2007; Antonelli, 2017).

En este sentido es relevante analizar la tendencia de estos dos indicadores a nivel internacional en materia de energías renovables. En la gráfica 3.8 se muestra el gasto realizado en I+D específicamente en energías renovables. El listado es comandado principalmente por países europeos quienes han iniciado su proceso de transición desde la década de 1980 (Wierling *et al*, 2018). Sin embargo, el país que lidera este rubro es Estados Unidos casi triplica el nivel de los países restante. En el caso de América Latina y Sudamérica únicamente aparece Brasil en tercera posición y México con una proporción similar a

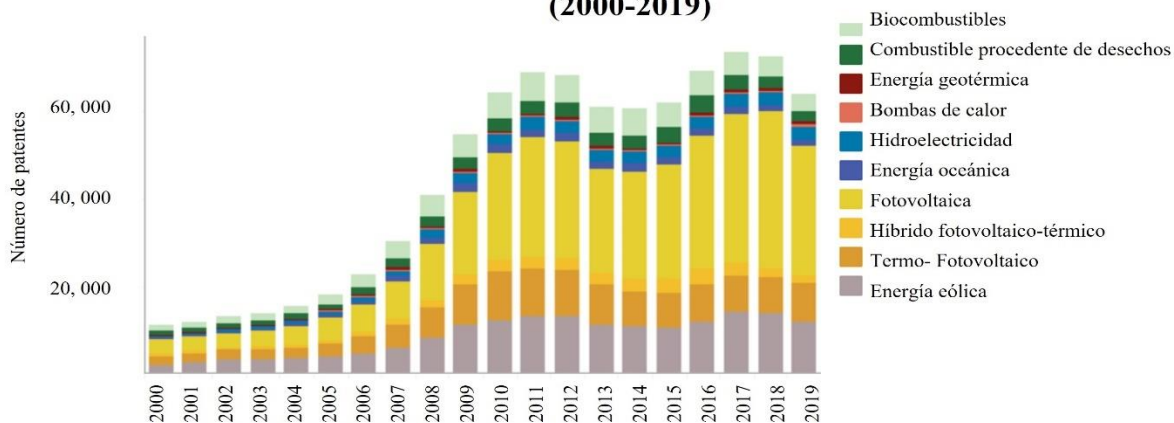


3.4.4 Patentes

Respecto a la evolución de patentes, el número creadas en el sector tecnológico renovable se indica en la gráfica 3.9. La orientación de los esfuerzos privados y públicos van hacia las aplicaciones fotovoltaicas, seguido de la energía eólica y en menor proporción en tecnologías termo-fotovoltaicos. Es interesante señalar, sin intentar afirmar una relación causal, que durante los años de 2007-2009 la tendencia internacional incrementó considerablemente. Como se indicó en apartados previos, las políticas de innovación para combatir el cambio climático se implementaron durante 2007. Mientras, en el año 2016

incrementa nuevamente el número de patentes posiblemente vinculado a la firma del Acuerdo de París.

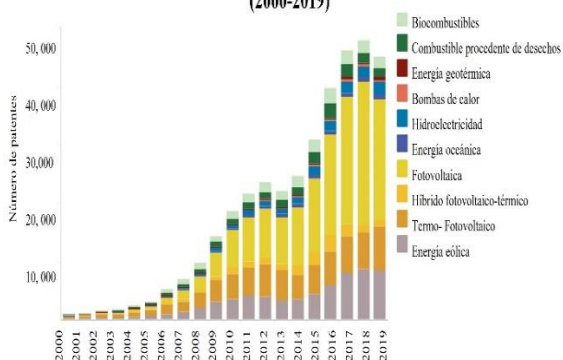
Gráfica 3.9. Mundial. Evolución de las patentes de energía renovable (2000-2019)



Fuente: *International Standards and Patents Energy (2022)*

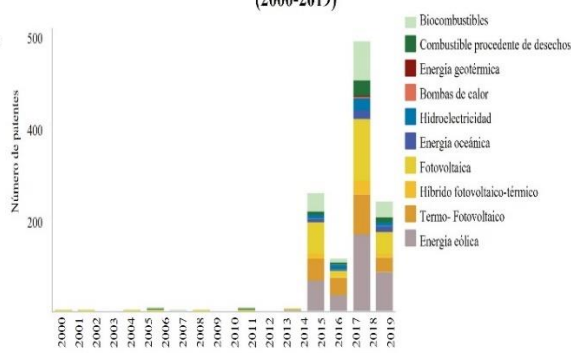
En términos de su política de patentes como elemento de la política de innovación, las gráficas 3.9 muestran su desempeño histórico de una serie de países que resultan representativos en su esquema de gestión eléctrica y su política de cambio tecnológico e innovación frente al cambio climático. Estos países, en un apartado posterior, serán referencia para el análisis de la transición energética al ser casos representativos internacionalmente de esta dinámica.

Gráfica 3.10. China. Evolución de las patentes de energía renovable (2000-2019)



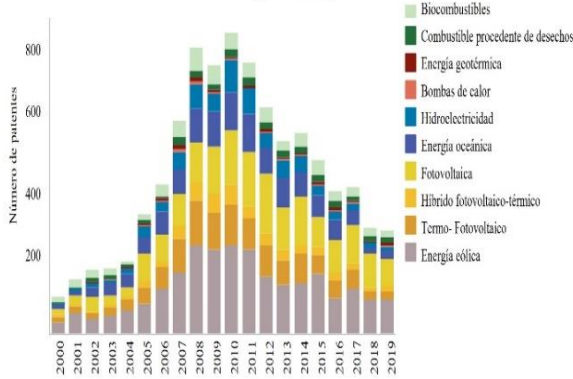
Fuente: *International Standards and Patents Energy (2022)*

Gráfica 3.11. India. Evolución de las patentes de energía renovable (2000-2019)



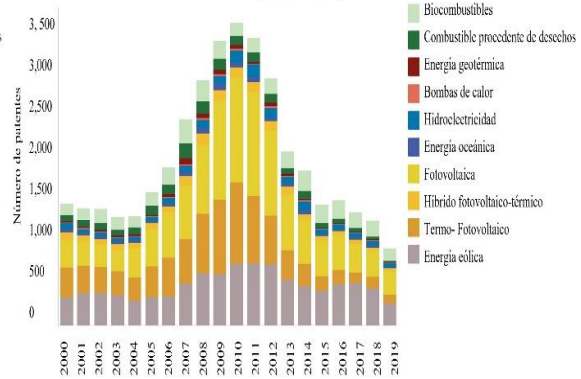
Fuente: *International Standards and Patents Energy (2022)*

Gráfica 3.12. Reino Unido. Evolución de las patentes de energía renovable (2000-2019)



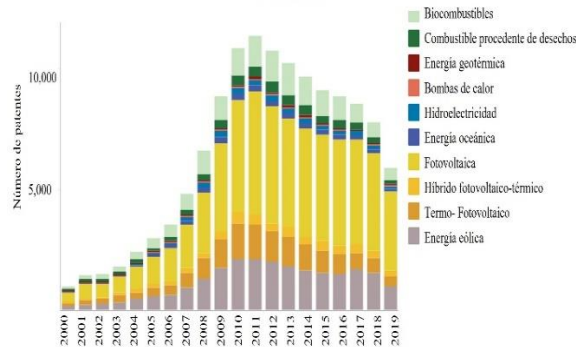
Fuente: International Standards and Patents Energy (2022)

Gráfica 3.13. Alemania. Evolución de las patentes de energía renovable (2000-2019)



Fuente: International Standards and Patents Energy (2022)

Gráfica 3.14. Estados Unidos. Evolución de las patentes de energía renovable



Fuente: International Standards and Patents Energy (2022)

En el caso estadounidense, vinculando el gasto de I+D y las patentes, existe una relación positiva entre ambas variables. Sin embargo, a pesar del gran número de patentes, la dinámica norteamericana se ha desacelerado. En el caso inglés sucede un fenómeno similar. A partir del 2011 comienza un declive de patentes anuales estancándose en 260 para el año 2019. El caso chino representa un fenómeno sin precedentes que, a diferencia de Estados Unidos y Reino Unido, su tendencia es ascendente. Alemania, un país líder y ejemplo para la transición, tuvo una ola ascendente sostenida del 2005 al 2010, sin embargo, su caída ha representado estar para 2019 en niveles de patentamiento menores que en el año 2000. Mientras la nación india apenas comienza su transitar siendo el 2018 el año más dinámico.

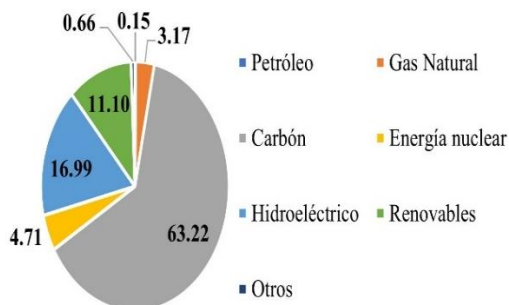
3.5 La transición energética en el sector eléctrico internacional

3.5.1 Experiencias internacionales

Como se mostró en el apartado 3.4.4 si bien los costos, el gasto en I+D y las patentes son relevantes para explicar la dinámica de la innovación como respuesta creativa del sector energético para incidir contra el cambio climático, en el desarrollo del trabajo, principalmente capítulo 2 y el actual, se ha señalado la importancia de analizar el tránsito energético desde una perspectiva socioeconómica. En este sentido, se analizará de manera especial los casos de China, India, Reino Unido, Alemania y Estados Unidos al ser países dinámicos en su constitución multinivel a fin de lograr disminuir el impacto de su sector energético, en particular del sector eléctrico. Asimismo, se considera que los cinco países representan de buena manera los distintos procesos de transición energética a nivel global. Además, como se mostró en la gráfica 3.2 los 5 países se enfrentan al reto enorme de disminuir sus emisiones de efecto invernadero debido al gran nivel que han causado durante su trayectoria.

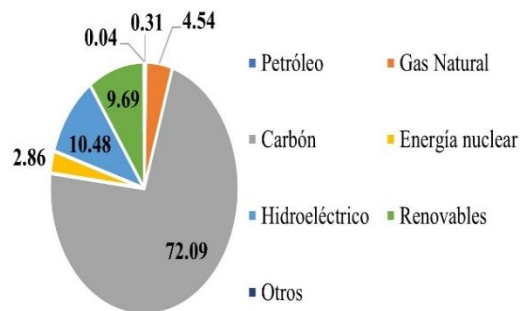
En las gráficas 3.15-3.19 se presenta su producción eléctrica por tipo de fuente energética.

Gráfica 3.15. China. Producción de energía eléctrica por tipo de fuente (2020) (porcentaje)



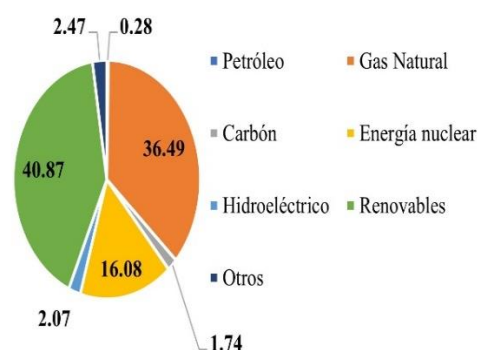
Fuente: Elaboración propia con base en BP Statistical Review of World (2022)

Gráfica 3.16. India. Producción de energía eléctrica por tipo de fuente (2020) (porcentaje)



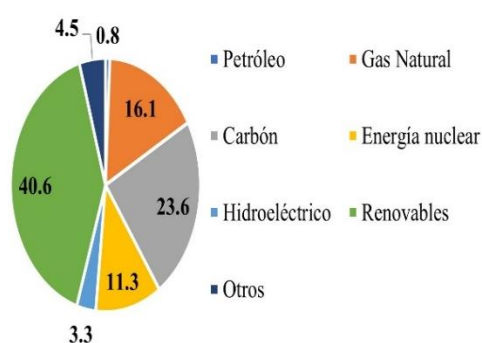
Fuente: Elaboración propia con base en BP Statistical Review of World (2022)

Gráfica 3.17. Reino Unido. Producción de energía eléctrica por tipo de fuente (2020) (porcentaje)



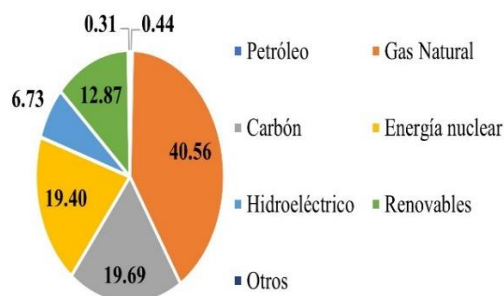
Fuente: Elaboración propia con base en BP Statistical Review of World (2022)

Gráfica 3.18. Alemania. Producción de energía eléctrica por tipo de fuente (2020) (porcentaje)



Fuente: Elaboración propia con base en BP Statistical Review of World (2022)

Gráfica 3.19. Estados Unidos. Producción de energía eléctrica por tipo de fuente (2020) (porcentaje)



Fuente: Elaboración propia con base en BP Statistical Review of World (2022)

En el caso de Reino Unido es el país con mayor proporción de energía renovables sin considerar el sector hidroeléctrico y gas natural⁵⁰, siendo prácticamente igual que el caso alemán. Más alejados se encuentran Estados Unidos, China e India. En el caso de los últimos dos países, su esquema de generación eléctrica sigue dominado por fuentes fósiles como el carbón y petróleo.

Las gráficas presentadas muestran el predominio de las tecnologías fotovoltaica y eólica como los elementos centrales de la energía renovable. Sin embargo, al analizar las estadísticas surgen varias preguntas acerca de la marcha de transición. ¿por qué China con

⁵⁰ En la literatura e informes gubernamentales existe una controversia sobre medir las energías renovables debido a su naturaleza. La tecnología hidroeléctrica y gas natural pertenecen a tecnologías renovables de primera generación, sin embargo, su obtención deviene de métodos extractivistas. La segunda generación de tecnologías renovables, en cambio, utilizan como fuente energética los flujos naturales existentes.

su elevado nivel de patentes apenas produce el 11% de su electricidad con fuentes renovables? En un caso contrario, ¿Cuáles son las causas por las cuales no se vincula el gasto de I+D con el nivel de patentamiento de Reino Unido? ¿A qué factores se asocia el 40% de producción eléctrica renovable? En el caso alemán, ¿por qué la caída en su nivel de patentamiento en energías renovables no se ha reflejado en la proporción de energías limpias? Para Estados Unidos, ¿por qué su gasto en I+D no se refleja en sus patentes en tecnologías renovables? ¿Cuáles son las causas que produjeron que India en años recientes se incorpore hacia las tecnologías renovables en el sector eléctrico? ¿qué actores están detrás del cambio? ¿Cuáles son las condiciones institucionales de cada país? ¿han logrado una transición exitosa?

Estas interrogantes difícilmente se resolverán con un análisis estrictamente estadístico y vinculado únicamente a la política de innovación. Por lo tanto, se reivindica la necesidad de analizar el tránsito energético del sector eléctrico internacional a partir de experiencias de largo plazo vinculantes con los diversos actores, sectores, reglas, leyes, instituciones, tecnologías y sobre todo desde una perspectiva histórica. Además, es necesario medir el grado de éxito de la transición en términos de sus implicaciones sociales para todos los agentes participantes y aquellos que no han logrado integrarse. Por tanto, los siguientes apartados retoman los casos de China, India, Reino Unido, Alemania y Estados Unidos desde una perspectiva multinivel como protagonistas de la transición con el objetivo de obtener elementos particulares bajo los cuales pueden explicarse relativamente el movimiento hacia un sector eléctrico de bajo impacto ambiental. La taxonomía obtenida desde el enfoque de transición socio tecnológica permitirá acercarnos a los factores que impulsan u obstaculizan la transición internacional.

3.6. Experiencia internacional de la transición sociotécnica: Una mirada desde el Modelo Multinivel Bioevolutivo

3.6.1 China

El país asiático es el mercado de energía renovable más grande al poseer un tercio de la capacidad eólica y un cuarto de la capacidad solar del mundo (Zheng *et al.* 2021). A finales de 2018 las energías hidroeléctrica, marina, eólica, solar, bioenergía y otras, alcanzaron los

729 GW, lo que supone el 38,4 % de la capacidad de generación total del país y alrededor del 30 % de la capacidad renovable total del mundo Cao *et al.* (2020).

La transición del sector eléctrico ha sido resultado de un complejo proceso de reformas. La primera etapa 1945-1985 estuvo liderada por el monopolio estatal en la generación de electricidad, privilegiando el uso del carbón como primera fuente energética (Andrews-Speed, 2012). Al igual que la mayoría de las naciones en el mundo, el sector eléctrico se vio expuesto a un conjunto de críticas respecto a sus costos de operación y eficiencia.

Como resultado, inició un profundo plan de reestructuración institucional durante la década de 1990⁵¹. En primer lugar, en 1997 apareció la Corporación Estatal de Energía de China (SPCC) a fin de reducir el control estatal de la producción únicamente en 50%. Posteriormente durante 1998 se impulsó una estructura de empresas mixtas bajo el control regional y provincial que permitiera la inversión privada y la comercialización de electricidad reflejándose en la creación de nuevas tarifas de precios a los usuarios.

De acuerdo con Karpus (2007) durante 1990 y 2000 el campo de la innovación estuvo abandonado a causa del bajo nivel de absorción tecnológica de las empresas estatales y la falta de competencia. Si bien el Estado mantuvo el 50% de la generación poseía el control administrativo de las empresas regionales. Al respecto, el autor señala una barrera institucional para la innovación debido a su rigidez debido a que los nombramientos políticos al frente de los ministros regionales no corrían riesgos pues optaban por cumplir con sus funciones en lugar de emprender sus iniciativas. Además, la temporalidad quinquenal no garantizaba su continuidad.

Adicionalmente, dos factores a nivel macro y meso incidieron en esta etapa sobre la transición. La primera se refiere a las grandes tasas de crecimiento económico registradas por China que demanda de altos niveles de consumo energético razón por la cual no existían motivos para echar marcha atrás al proceso de crecimiento y posicionamiento competitivo en

⁵¹ De acuerdo con Zhang *et al.* (2020), este proceso resultó del cambio de ideología del partido comunista durante esta década volcada más hacia el mercado exterior.

los mercados internacionales. La segunda responde a una visión de autosuficiencia por parte de las autoridades gubernamentales quienes se consideraban capaces de generar la energía necesaria para el crecimiento. Asimismo, en la sociedad china existe una visión lineal acerca de la naturaleza y energía que son vistas como proveedoras (Janardhanan, 2021).

Un cambio radical en la estructura organizacional fue la reforma al sector del 2002 donde la generación de energía eléctrica se abrió a la competencia entre cinco empresas de generación recién establecidas⁵² y dos empresas de transmisión a fin de reducir la participación estatal al 40%. Esta totalidad fue repartida en 20% por igual. De acuerdo con Yan *et al.* (2019) esta reforma buscó erradicar el monopolio relativo del sector. Por objetivos se establecieron la participación de grandes clientes en la participación de la red nacional, fortalecimiento de un mercado minorista para que los usuarios compren energía a las empresas independientes y el impulso del “internet de la energía” donde los consumidores de electricidad pueden interactuar con la red eléctrica y combinar el uso de la electricidad con otras fuentes de energía. A este punto se regresará más adelante.

A partir de la reforma del año 2004 comienza una preocupación por los niveles de ECO2⁵³ en el país. Para contrarrestar el dominio de las termoeléctricas e hidroeléctricas comienza en el año 2005 un despliegue de la energía solar gracias a la ley de energía renovable. Las empresas pioneras en el sector, Suntech, Yingli y Trina, accedieron al financiamiento internacional recaudando cerca de 400 millones de dólares (Gao y Yuan, 2020).

Asimismo, el Estado impulsó la generación de nichos tecnológicos. Bajo las modificaciones de apertura de la reforma del 2002, el gobierno lanzó concursos de adjudicación para empresas productoras de electricidad de origen solar. Durante 2009 y 2010 el gobierno otorgó 14 licitaciones repartidas entre pequeños y grandes productores cuyo margen de ganancia estaba garantizado con el objetivo de absorber parcialmente los costos fijos. Esta coalición entre Estado-empresas se extendió con un sistema de subvenciones para

⁵² Estas empresas son las corporaciones Huaneng, Datang, Huadian, Gouodian y el grupo de inversión de energía en China.

⁵³ Para 2008 el 48% de ECO2 fueron causadas por el sector eléctrico chino (AIE, 2021).

amortizar los gastos de infraestructura. Como resultado, el despegue de la industria comienza formalmente en 2011 (Zhou *et al.* 2018). El gigante asiático se convirtió en líder mundial en la industria fotovoltaica gracias al apoyo gubernamental quien exentó de impuesto al valor agregado, eliminó el impuesto para la compra de equipos y silicio para la fabricación de paneles y brindó apoyos fiscales a los productores de celdas solares (Elshurafa *et al.* 2019)

Junto al desarrollo de nichos renovables, el sector eléctrico se movilizó hacia la vanguardia tecnológica. En afán de terminar con el monopolio relativo, como ya se señaló líneas previas, comenzó el impulso de redes inteligentes de electricidad. Esta práctica empodera al consumidor al fomentar la competencia y calidad del servicio. La modalidad permite racionalizar la generación de energía, frena las pérdidas de transmisión, identifica rápidamente las fallas de suministro y facilita la integración de pequeños proveedores de energía renovables (Moretti *et al.* 2017).

El esquema institucional permitió el desarrollo de estos esquemas, aunque su difusión ha sido lenta. En efecto, Yan *et al.* (2019) narran la experiencia de la ciudad de Shenzhen que implementó un mercado minorista de electricidad liderado por dos empresas State Grid Corporation of China y China Southern Power Grid; el Estado fue el encargado de apoyar medidores inteligentes. Los resultados fueron favorables para los consumidores quienes devolvieron información sobre el funcionamiento de la red y desarrolló un sistema de precios más flexibles al encargarse de la administración de la energía.

El actual desarrollo del sector eléctrico chino se enfrenta a retos y barreras. La modernización de la matriz energética aún sigue dominada por electricidad procedente del carbón e hidroeléctricas (Zhou *et al.*, 2018). En particular, la construcción de hidroeléctricas ha causado demasiado malestar en la población. Para 1990 se estimaba que cerca de 10 millones de personas habían sido desplazadas por este tipo de proyectos (Andrews, 2012).

Respecto al desarrollo de nichos tecnológicos existen barreras de varios tipos. El primero asociado a la política internacional. Yan *et al.* (2019) señalan que Estados Unidos y los países europeos acusaron a la nación asiática por actos antidumping en la fabricación de paneles solares. En segundo lugar, el federalismo en la generación de electricidad dio independencia en la generación de electricidad. Sin embargo, la falta de experiencia de los

bancos regionales y la falta de mejores remuneraciones hicieron fracasar la expansión del mercado solar concentrándose principalmente en el norte. Al respecto Wang *et al.* (2020) señalan que la instalación de generadores no corresponde a los patrones de demanda regional, volviendo complicado los procesos de transferencia de electricidad.

Por otro lado, Zhao y Luo (2017) indican que los límites a las innovaciones eólicas se enfrentan principalmente a la dependencia del mercado externo. La falta de conocimiento en la conversión de las células de silicio monocristalino y policristalino hace que los paneles solares se compren en el exterior.

A pesar de estos límites, existe un factor institucional que ha favorecido el desarrollo de electricidad renovable. Si bien las cifras muestran un descenso de la capacidad de fuentes renovable (EIA, 2021), esto forma parte del plan quinquenal 2016-2020 cuyo objetivo es centralizar la producción de electricidad renovable y evitar excedentes. Además, Li y Taeihagh (2020) señalan que el plan quinquenal de desarrollo tiene como ejes rectores la “construcción de una civilización ecológica” y “revolución de producción”. Frente a ello, el gobierno dio un vuelco inesperado y apoya fuertemente los proyectos locales de energía eólica. El discurso en favor de las energías renovables en la producción de electricidad produjo una ola de confianza entre los inversionistas que expandió el mercado eólico y solar fuertemente.

Analizando la dinámica de la transición china, la figura 3.3 muestra las principales interacciones y procesos coevolutivos. Con el Modelo Multinivel Bioevolutivo desarrollado en el capítulo 2 es posible ordenar el espacio de retroalimentaciones para identificar los impulsos para la transición y las variables más importante, además es una herramienta que facilita entender la dinámica. En su conjunto, el modelo permite conceptualizar el tipo de transición y su desempeño entrópico.

Los espacios sombreados con rojo indican las condiciones iniciales a las cuales se enfrenta la transición. Por el lado del espacio macro, el alto crecimiento vinculado a fuentes fósiles representa un desincentivo para la inversión en renovables. Por otro lado, la falta de conocimiento y habilidades de las empresas impidió la creación de nichos. Adicionalmente, la estructura del sector y los altos niveles de contaminación provocaron un proceso

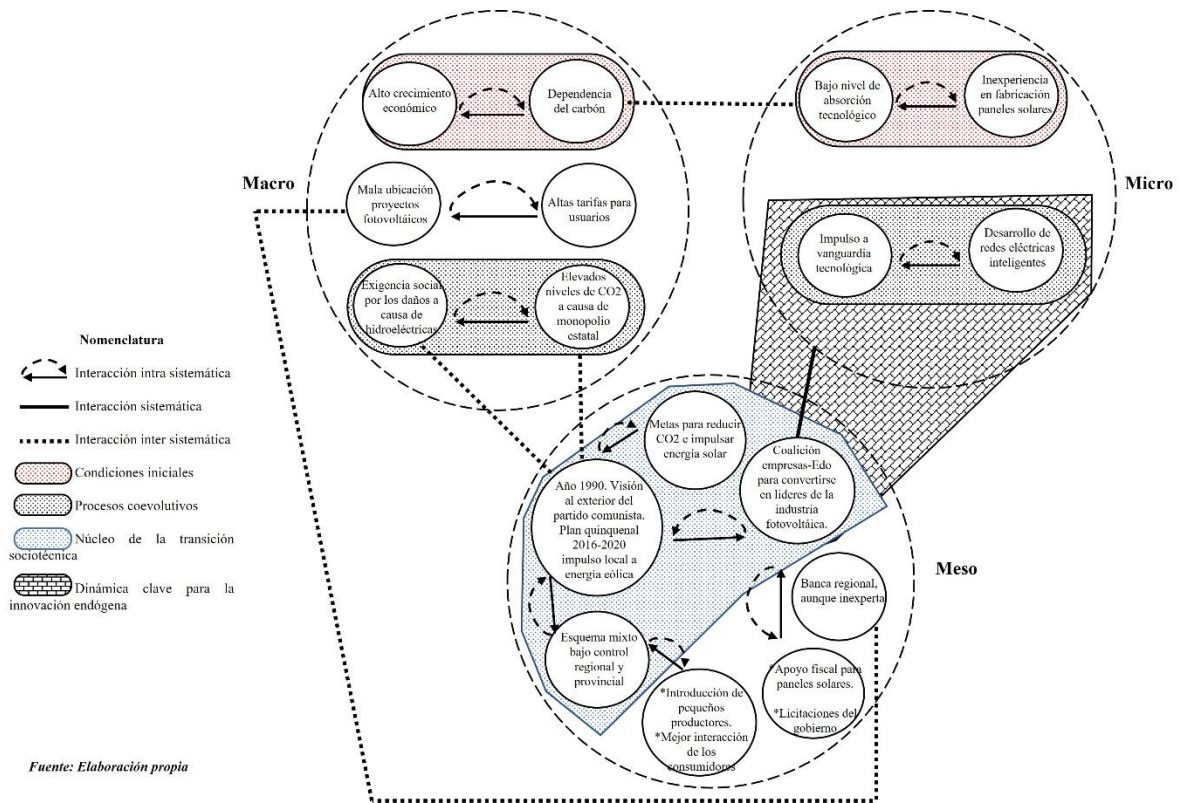
coevolutivo (sombreado negro) en la cultura energética de la población que resultó en la exigencia de mejores situaciones ambientales.

Dichas condiciones macro produjeron una retroalimentación sobre el espacio meso. Como se ha señalado, un núcleo central es la visión del gobierno comunista. La configuración de planes quinquenales llevó a un proyecto fuerte hacia el desarrollo de energías renovables en el sector eléctrico y metas para reducir las ECO₂. El núcleo de la transición (sombreado azul) está integrado por la apertura del mercado eléctrico a un esquema mixto, operadores regionales y provinciales como entes regulatorios. La nueva configuración impulsó la introducción de pequeños productores cuyo servicio benefició la interacción con los usuarios. Conjuntamente, el nivel micro se benefició por la postura estatal para crear un liderazgo en la industria fotovoltaica gracias principalmente a la retroalimentación producida por los estímulos fiscales y esquema de licitaciones. Contrariamente, el esquema de financiamiento regional produjo una retroalimentación negativa al permitir la instalación de proyectos fotovoltaicos en regiones territoriales inadecuadas y, por consecuencia, elevando el precio de los recibos eléctricos.

Gracias al núcleo de la transición, se produjo un proceso coevolutivo en las empresas quienes tuvieron una respuesta creativa para el desarrollo de nichos vinculados a las redes eléctricas inteligentes. En conjunto, el proceso de innovación endógena tuvo origen en el espacio meso y suscitó la respuesta emergente en los nichos de energía renovable. De manera gráfica este proceso se muestra con un sombreado negro con líneas al interior.

El caso de China exhibe el papel del Estado y la visión gubernamental para transformar las condiciones macro (dependencia de combustibles fósiles). El proceso de transición sociotécnica muestra un proceso coevolutivo vinculado al núcleo de la transición que permitió crear nichos relevantes en energías renovables y transformar la matriz energética de manera considerable. Tal como se señaló en la gráfica 3.15, para el año 2020 este segmento representó el 11% de la producción eléctrica general. Estos rasgos permiten caracterizar al caso chino, con base a la taxonomía de las transiciones propuesta en el capítulo 2 (apartado 2.9) como una *transición eléctrica de gobernanza amplificada* con un desempeño que permite reducir el impacto entrópico de manera sustancial.

Figura 3.3. China. Modelo Multinivel Bioevolutivo de la transición sociotécnica



3.6.2 India

Esta nación es considerada como el éxito de la transición energética dentro de los países subdesarrollados (Bhushan *et al.* 2020). El contexto histórico de esta nación es similar a la mayoría de los regímenes en el mundo. desde 1947 a 1970 estuvo controlado por el gobierno. Como aspecto relevante, desde 1948 el gobierno indio reconoció la importancia de un sistema energético sostenible vinculado al desarrollo regional (Sarangi *et al.*, 2019).

Durante la década de 1990 el sector vio cambiar su estructura productiva al terminar con el monopolio público debido al gran nivel de endeudamiento y la ineficiencia técnica. Si bien para esa época la generación era 6 veces mayor al nivel de los años 40's, de la cual el 51% provenía del carbón, el 42% con hidroeléctricas, el 2% del diésel y el 0% de eólica y solar (Moallemi *et al.* 2017a), el nivel era bajo para las exigencias de una economía pujante (Bardhan *et al.* 2019).

En la primera década del actual siglo se llevó a cabo un profundo plan en favor de la

liberalización del mercado eléctrico y la implementación de energías renovables. En particular, la reforma del 2003 diseñó un mercado multicomprador -multivendedor que integró a la iniciativa privada en el comercio y permitió la integración de las zonas urbanas y rurales gracias a proyectos de pequeña escala. En materia ambiental, el Plan Nacional de Acción Climática del 2008 buscó integrar la producción de energías renovables sin lograr los resultados deseables (Bardhan *et al.* 2019), aunque estableció elementos que en el futuro serían de ayuda en su expansión como la obligación de compra de energía renovable. Este punto se abordará más adelante.

Los esfuerzos en la primera ola de difusión de electricidad procedente de energías renovables se enfrentaron a una serie de obstáculos por el lado de la demanda. A diferencia del caso chino, la India tiene graves problemas estructurales como la pobreza energética. Este fenómeno hace referencia a la población que no puede acceder al servicio eléctrico, alrededor de 300 millones de personas estaban dentro de situación de vulnerabilidad debido a la falta de ingresos para saldar su recibo y la falta de generación eléctrica suficiente para cubrir la demanda total de la población (Moallemi, *et al.* 2017b). Al mismo tiempo, la pobreza vía ingreso indujo a la población a no pagar por la electricidad.

En conjunto, la cosmovisión acerca de la electricidad influyó fuertemente sobre la dinámica de las renovables. Dentro de la población india los servicios que brinda la naturaleza son considerados gratuitos, aspecto que vuelve inviable cualquier proyecto de generación y transmisión. Para confrontar esta situación, el gobierno identificó en los censos a las castas más pobres a fin de brindarles kits básicos de conexión (Acharya y Sadath, 2017).

Desde una lente institucional, el primer esfuerzo gubernamental creó un mercado que integró las energías renovables por primera vez, en cambio no logró la transformación radican en los aspectos sociales, estructurales, sociales y técnicos que requiere el tránsito sociotécnico. Kompella (2022) describe las falencias del crecimiento inicial de las energías renovables. Principalmente, los subsidios y subvenciones hacia los primeros proyectos de inversión se convirtieron en lastre a las finanzas estatales. Por otra parte, la mala ubicación de los proyectos eólicos y solares condujo a una subutilización de las plantas instaladas mientras que la calidad del sistema de distribución y transmisión no estaban en condiciones

para distribuir eficientemente la energía.

Los esfuerzos para crear un mercado de energías renovable competitivo se reforzó. El Plan de Acción Nacional sobre el Cambio Climático en 2008 tuvo continuidad y se amplió su potencial con la Misión Solar Nacional Jawaharlal Nehru del año 2010. Moallemi *et al.* (2017b) y Mahapatra (2021) describe los mecanismos que ayudó a superar los resultados de la primera ola de renovables principalmente enfocada en la energía solar. Entre los puntos más importantes destacan:

- Libertad a los concesionarios para comprar energía eléctrica solar y eólica de manera rentable.
- Obligación a las regiones de la India para adquirir energía renovable tanto de productores solares pequeños (menos de 5 MW de capacidad) y proyectos eólicos (menos de 25 MW de capacidad). La compra corresponde al 5% del total desde el 2010 e incrementará en 1% cada año hasta 2020.
- Permitir la inversión extranjera directa hasta el 100% en cada proyecto.
- Realización de grandes proyectos de infraestructura para integrar a productores de gran escala a la transmisión nacional.
- Ayuda del Banco Central de la India para identificar a las empresas eléctricas que produzcan energía renovable y facilitar su flujo de capital.
- Créditos de energía renovable entre estados. Aquellos con alta generación de electricidad eólica o solar pueden vender sus certificados a otros estados con el respaldo del Estado para entregar la energía máximo 6 meses después de la compra.
- Tasas de retorno garantizadas del 16%.
- Durante 2013 y 2017 los gobiernos estatales fueron obligados a comprar la electricidad a una tarifa fija.

En materia de política de innovación, durante 2010 al 2013 la fabricación de paneles solares exigió su fabricación con tecnología nacional de silicio cristalino a fin de identificar y hacer crecer los nichos tecnológicos locales (Kar y Sharma, 2015). Esta época también se caracterizó por la creación de acuerdos de cooperación con el extranjero, por ejemplo, Australia, para el

desarrollo de fuentes renovables rentables. De forma simultánea, el desarrollo de capacidades fue posible gracias al impulso de la I+D vía gasto de gobierno aplicando los avances tecnológicos locales en zonas rurales. Desde la ideología del partido, la fabricación de capacidades nacionales generaría mayores empleos e impulsaría las exportaciones (Moallemi *et al.*, 2017a)

Las barreras hacia la generación de electricidad limpia se deben principalmente a factores institucionales más que técnicos (Kompella, 2020; Galan, 2021; Moallemi, 2017b; Mahapatra *et al.* (2021). A pesar de su crecimiento, apenas representan el 12% de la capacidad instalada (Galan, 2021).

Ello se debe a la desigual distribución territorial de las plantas eólicas y solares concentrándose en ocho estados ⁵⁴ dejando en desventaja al resto de comunidades quienes pagan un precio más elevado y se vuelve más intermitente su disponibilidad. Asimismo, la evidencia apunta a la falta de alianzas estratégicas y cooperación, mientras en el espacio tecnológico aún se depende de la tecnología importada debido a la falta de preparación de especialistas en fabricación de paneles de silicio.

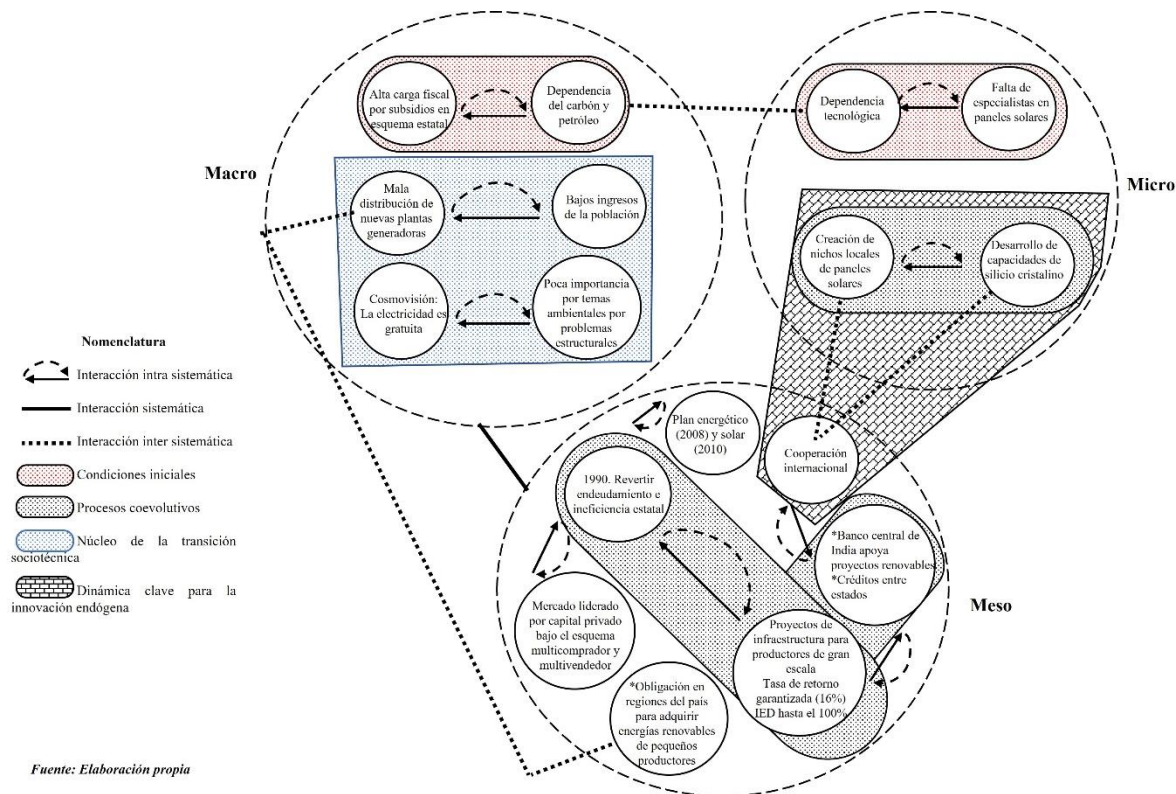
La figura 3.4 muestra el Modelo Multinivel Bioevolutivo para la India. Este proceso es interesante debido a la postura del gobierno por revertir la dependencia del carbón y reducir el endeudamiento del esquema centralizado de generación eléctrica (condiciones iniciales). A partir de la década de 1990 se abrió el mercado de generación a la iniciativa privada impulsando una serie de acciones para generar nichos de energía renovables. Entre los procesos coevolutivos más importantes se encuentra las retroalimentaciones entre inversión pública en infraestructura, créditos de la banca central y las instancias estatales además del establecimiento de tasa de retorno atractivas. Al igual que el caso chino, en el afán de reforzar estos lazos se obligó a ciertas regiones adquirir energía eléctrica limpia, pero generó una mala distribución territorial de las plantas generadoras.

Dentro del plan de reestructura sociotécnica, el punto clave para el desarrollo de nuevas

⁵⁴ Tamil Nadu, Andhra Pradesh, Karnataka, Gujarat, Maharashtra, Rajastán, Himachal Pradesh-Jammu y Cachemira

tecnologías fue la cooperación internacional produciendo un proceso coevolutivo reflejado en capacidades en paneles solares y energía eléctrica fotovoltaica. Es decir, el proceso endógeno de innovación comenzó gracias a la disponibilidad del conocimiento extranjero junto con los instrumentos a nivel meso.

Figura 3.4. India. Modelo Multinivel Bioevolutivo de la transición sociotécnica



Como se ha señalado a lo largo del apartado, existen condiciones iniciales fuertes para la difusión de energías renovables. En primer lugar, a nivel micro, la dependencia de fuentes fósiles produjo un estancamiento de las capacidades tecnológica reflejado en la falta de especialistas en energías solares. En el espacio macro, la transición sociotécnica se enfrenta a factores estructurales como bajos ingresos y la cultura energética que conceptualiza la electricidad como un servicio gratuito. Dichas retroalimentaciones desalientan el proceso de transformación energética, consecuentemente, el núcleo de la transición (área azul) depende principalmente de resolver estos problemas. La ventaja actual es el desarrollo de mecanismos a nivel meso que comienzan a dar a impulsar la energía eléctrica renovable. Por tanto, con

base en la taxonomía de la transición, el caso de la India se identifica como *transición eléctrica de régimen y paisaje condicionado*, siendo el espacio macro la barrera más importante.

3.6.3 Reino Unido

A diferencia de otros países, la transición energética en el sector eléctrico británico se desarrolló de manera rápida y acelerada. Desde 1947 hasta 1972 el petróleo fue el insumo energético preferido para la elaboración de electricidad. El esquema de distribución estuvo dirigido por una junta central que agrupó a las juntas regionales de la nación. La mayor parte de la red eléctrica se construyó entre 1950 y 1960 (Foxon *et. al.*, 2020). Posteriormente, durante 1973 y 1990 el carbón y petróleo ganaron terreno hasta representar el 90% de la generación y el petróleo apenas el 1% (Grubb y Newbery, 2018). La capacidad instalada, al igual que la mayoría de los casos en el mundo, era propiedad del Estado bajo un esquema de producción vertical consolidando despachos regionales de producción en Gales, Irlanda del Norte, Inglaterra y Escocia.

El punto de quiebre fue durante 1989 con el decreto de la Electricity Act. En ella se estableció la desaparición de los proveedores regionales migrando hacia un esquema privado. Con este golpe a la estructura público que domino por más de 40 años el Reino Unido se convirtió en pionero del esquema privado de mercado en los servicios energéticos (Phellps, 2022).

Entre los puntos relevantes en el proceso de liberalización, Inderberg *et al.* (2018) señalan la implementación de un sistema descentralizado que inició la venta de empresas estatales. Como resultado, nacieron grandes empresas privadas conocidas como “The Big Six” integradas por British Gas, EDF Energy, E. ON, RWE power, Scottish Power y SSE.

Posteriormente en la Ley Eléctrica de 1990 se implementaron los primeros pasos para la creación de un mercado de energía eléctrica renovable a partir de dos instrumentos: la adopción de Obligación de Energías Renovables (RO), la Obligación de Combustibles No Fósiles (NFFO), que fueron rondas de contratación de energía renovable. De acuerdo con Kern *et al.* (2014) estas medidas buscaban utilizar los fondos generados para apoyar la

difusión de la energía nuclear. Es decir, fue una estrategia oportunista para enmascarar, bajo la idea de fuentes renovables, la construcción de plantas nucleares.

Tanto el RO y NFFO, de acuerdo con los autores, aparecieron de una forma sorprendente en el debate público pues no tenían un objetivo claro sobre la producción anual ni la forma de organización. Durante 1990 y 1991 se llevaron a cabo dos rondas de adjudicación que se reflejaron en la instalación de parques eólicos. Sin embargo, la población mostró un rechazo debido a que las plantas eólicas estaban financiando energía nuclear. Este experimento representó la primera barrera creada desde la política estatal para la aceptación de la energía renovable.

Frente a la inconformidad, se modificó radicalmente los esquemas de NFFO y RO. El cambio de los mecanismos de operación puede explicarse en gran medida por la llegada al poder del Partido Laborista en 1997 (Carter y Jacobs, 2014). En el año 2000 se registró una reforma al servicio público que separa las funciones de generación, distribución y suministro al tiempo que exige licencias para cada operación. Además, hubo un cambio disruptivo que fue la integración de pequeños y micro productores en la red eléctrica nacional.

Para 2002 se implementó el esquema de certificados de Obligación Renovable. Esta plataforma obligó a los proveedores de electricidad comprar y suministrar una determinada cantidad de energía renovable, siendo el 3% la dotación pactada. De acuerdo con Carter y Jacobs (2014) esta medida ayudó fomentó la instalación de plantas fotovoltaicas. Complementariamente, en agosto del 2003 Stephen Timms, el entonces nuevo Ministro de Energía del Reino Unido, anunció una primera ronda de proyectos de energía renovable basados en la comunidad.

El programa denominado *Clear Skies* repartió apoyos económicos para que las comunidades fueran responsables de la generación de energía eléctrica. Esta iniciativa evolucionó en 2006 hacia el Programa de Edificios Públicos Bajos en Carbono otorgando a las microempresas y los hogares subvenciones para cubrir los costos de instalación de tecnologías de microgeneración en viviendas o edificios del sector sin fines de lucro. Desde una perspectiva sociotécnica, la participación de las comunidades, hogares y microempresas

en la generación de electricidad renovables representa una transformación disruptiva.

Después de los fallidos esfuerzos por inducir las fuentes renovables en la electricidad durante los años 90's, el gobierno británico mejoró la aplicación institucional de sus medidas. Desde el famoso Libro Blanco publicado en 2003 por parte del gobierno, se visualizó un futuro energético sostenible con la finalidad de disminuir las ECO2 en 60% para 2021 (Mitchell y Connor, 2004).

Los esfuerzos se consolidaron en 2008 con la creación de la Ley de Cambio Climático. El objetivo en materia de ECO2 es reducir su nivel al menos un 80% para 2050 en comparación con los niveles de 1990 (Grubb y Newbery, 2018). La dinámica de la estructura eléctrica liberalizada tuvo varios inconvenientes. Stirling (2020) señala que la crisis financiera del 2008 provocó un incremento importante en los precios de los combustibles fósiles se elevara, siendo un factor de riesgo para una estructura cuyo 88% de generación eléctrica dependía de estos insumos y que en su mayoría eran importados, aunado a la falta de un precio mínimo al carbono.

Otro elemento en contra de los pequeños competidores fue la ausencia de acuerdos tarifarios de distribución, es decir, no había un precio pactado más allá de un horizonte de tres meses. La falta de un precio seguro provocó gran incertidumbre en los productores pues la tarifa podía ser menor al precio de mercado (en el argot del sector, el *Pool* incluye el costo fijo y variable). Adicionalmente, la tasa de retorno de cada proyecto oscilaba entre 4 y 8 años, razón por la cual, ante la ausencia de un mercado a futuro que pactara los precios de venta produjo fuertes desincentivos.

Finalmente, la Unión Europea exigió que las plantas viejas de generación eléctrica fuesen retiradas o modernizadas, al tiempo que, como se señaló, las plantas generadas durante los 50's y 60's estaban llegando al fin de su vida útil. El mercado liberalizado durante 2008 produjo precios de la electricidad muy elevados demostrando que aún no estaba preparado para suministrar electricidad de manera segura y asequible (Reno, 2011). Como resultado, se gestó una segunda ola de desconfianza sobre la liberalización y la introducción de energías renovables, aunado al crecimiento en los indicadores de pobreza energética (Demski *et al.* 2019). Es decir, la imposibilidad de adquirir energía con cierto porcentaje del ingreso.

Para corregir estas fallas, en el año 2010 se impulsó un escenario más equitativo para los pequeños productores respecto a las *Big Six*. El establecimiento de la Feed-in Tariffs (FIT), es una tarifa de autoabastecimiento que obliga a ciertos proveedores de electricidad licenciados ante el gobierno a pagar tarifas fijas a los micro y pequeños generadores de energía por la electricidad generada y que venden para que sea distribuida en la red nacional.

Esta modificación junto con la asignación de un precio mínimo al carbón, provocaron una ola nunca antes vista de microproductores y comunidades (Carter y Jacobs, 2014). El diseño de la FIT estableció tarifas garantizadas por 25 años siendo mayor para las plantas menores a 5MW. Con esta medida, la inversión inicial tendría un retorno del 8%. El FIT presentó una buena oportunidad de inversión para el sector privado (Carter y Jacobs, 2014).

El período 2010–2015 vio un aumento explosivo de micro y pequeños productores principalmente invirtiendo en sistemas fotovoltaicos de hasta 5MW. Para 2010 eran cero y en 2015 eran 700 demostrando el potencial del sistema eléctrico para una producción cada vez mayor de energía renovable de una manera descentralizada (Stirling, 2020). Además, un factor que permitió la difusión de las energías renovables fue una campaña durante 2011 y 2013 para difundir las ventajas de la tecnología para generar energía eléctrica limpia a fin de cambiar la cultura energética (Renaldi, *et al.* 2021).

A pesar del crecimiento de la energía renovable en la matriz energética eléctrica su nivel aún era bajo. En 2014, la proporción de combustibles utilizados para la generación de electricidad fue la siguiente: gas 30 %, carbón 30 %, renovables 19 %, nuclear 19 % y otros combustibles el 2.6% (Inderberg *et al.*, 2018). Para impulsar fuertemente a los pequeños productores se creó en 2012 la OFGEM como organismo regulador independiente para eliminar las barreras a nuevos participantes.

Más adelante, en 2014 se expidió la Ley de Sociedades de Beneficio Comunitario y Cooperativo en Inglaterra favoreciendo a las cooperativas energéticas⁵⁵ (Wierling *et al.* 2018). Esta regulación permitió desarrollar, desde una perspectiva sociotécnica, nichos de

⁵⁵ Esta ley se inspiró en el Esquema Comunitario y de Energías Renovables de Escocia de 2011, el Fondo de Evaluación de Energía Local de Inglaterra y Gales de 2012 y el Fondo de Energía de la Comunidad Rural de Inglaterra de 2013

difusión tecnológica de energías renovables en el sector eléctrico, por ello es relevante detallar sus características. De acuerdo con Miznaia *et al.* (2019) y Stirling la estrategia comunitaria regional desplegada en Reino Unido se divide en tres:

- a) Modelo de financiamiento comunitario: Permite el fomento de la participación de la población local en la inversión en energías renovables y fortalece el apoyo local para la nueva infraestructura energética. En el caso británico, este tipo de financiamiento reúne fondos de los integrantes para alquilar un lugar para producir la electricidad mientras conservan la propiedad de la tecnología.
- b) Modelo de asociación comunitaria: Colaboración entre empresas comerciales y comunidades para el desarrollo de electricidad limpia. Normalmente acuden a la banca privada para acceder a financiamiento.
- c) Organizaciones no enfocadas en energía: Este tipo de organización se desarrolla en lugares clave de las comunidades como iglesias y escuela. Únicamente generan energía para ellos mismos y reducir los gastos de esos lugares.

En el caso británico gran parte de la transición energética ha sido resultado de políticas específicas como acuerdos tarifarios, incorporación de microempresas e impulso de las comunidades energéticas. Asimismo, debe entenderse la innovación respecto al modelo de negocios para implementar nuevas actividades comerciales o establecer formas organizativas particulares para generar electricidad en lugar de generar revoluciones tecnológicas (Mirzania, *et al.* 2019).

La dinámica del esquema renovable británico se enfrenta a existe barreras que han detenido su expansión. De acuerdo con Carter y Jacobs (2014) los microproyectos se enfrentan a bajas tasa de financiamiento y subvenciones. A pesar de los esfuerzos la participación de la electricidad renovable apenas representó el 16% para 2016 (EIA, 2021). Conjuntamente, desde el 2016 se ha perdido el impulso gubernamental y aparición una falta de interés político (Levidow y Raman, 2020). Además, existe una tentación real hacia el uso del fracking para obtener gas e impulsar las centrales nucleares y la población está convencida que el grupo de Big Six siguen dominando el sector (Ly y Pye, 2018), creando una situación de alarma respecto a la percepción de la energía renovable.

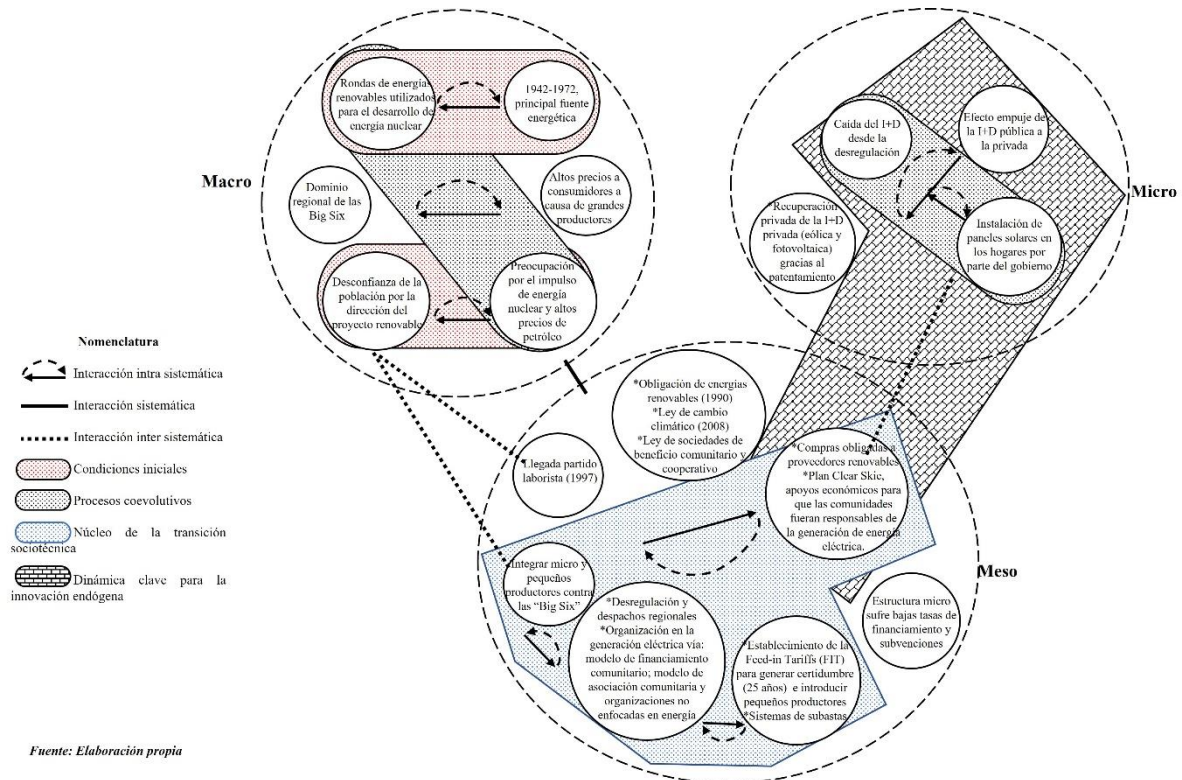
La figura 3.5 muestra el Modelo Multinivel Bioevolutivo para el caso de Reino Unido. Al igual que el resto de países del mundo, las condiciones iniciales (sombreado rojo) establecen una dependencia de combustibles fósiles. Como se ha señalado, se creó una estructura dominante de seis empresas. Sin embargo, la energía nuclear ha representado una fuente energética recurrente en la matriz energética local. Debido a ello, se impulsó un proceso evolutivo donde la preocupación de la población por el riesgo de la energía nuclear y los altos precios registrados por la crisis de los 70's se tradujo en una ola política preocupada por estos temas.

En efecto, el arribo del partido laborista abrió el mercado de la generación a las comunidades energéticas. Gracias a medidas como el establecimiento de tarifas FIT, sistemas de subastas, compras obligatorias de la energía eléctrica limpia generada y la autonomía económica-vía apoyos económicos- de las comunidades para hacerse responsables de la generación eléctrica constituyeron las retroalimentaciones más importantes para el núcleo de la transición sociotécnica (sombreado azul). Además, estos dos últimos elementos constituyen el factor clave para el desarrollo de nichos renovables. Estas garantías a nivel meso reforzaron el programa público de I+D y de instalación de paneles solares en las casas convirtiéndose en un proceso coevolutivo (sombreado negro); conjuntamente, se tradujeron en estímulo para la creación de nichos y el desarrollo de la innovación endógena (sombreado negro con textura de rayas). Al ser naciones con rutinas productivas de alto nivel tecnológico, el desarrollo de nichos se vincula más al espacio meso que a la disponibilidad de conocimiento o limitaciones de aprendizaje.

El caso británico muestra el éxito de la transformación sociotécnica gracias a la visión del gobierno y la apertura del mercado a las comunidades energéticas. Así como la dinámica del espacio meso para implementar las medidas necesarias, entre la más destacable, la tarifa FIT. El único aspecto negativo, como se ha señalado, es la inconsistencia del mensaje político que ha provocado olas de desconfianza entre la población. A medida que se logre un mensaje sin incertidumbre sobre las fuentes renovables de energía del sector eléctrico podrá instaurarse una transición sociotécnica ininterrumpida y estable. Estas características permiten ubicar al Reino Unido, con base en la taxonomía de transiciones, en *transición*

eléctrica comunitaria de ida y vuelta cuyo desempeño entrópico es favorable pues ha logrado disminuir el impacto energético del desempeño eléctrico, tal como muestra la figura 3.17, el 40% de electricidad es de origen renovable.

Figura 3.5. Reino Unido. Modelo Multinivel Bioevolutivo de la transición sociotécnica



3.6.4 Alemania

La nación germana representa un caso de éxito a nivel internacional y ejemplo por su acelerado tránsito hacia la generación de electricidad limpia. Al igual que la mayoría de los países en el mundo, el inicio del sistema eléctrico está fechado a finales del siglo XIX. De acuerdo con Chen *et al.* (2019), Emil Rathenau en 1884 compró una licencia para desarrollar las bombillas de Thomas Edison en Alemania y de esta manera obtuvo la primera concesión para distribuir electricidad en la ciudad de Berlín. En su camino hacia la consolidación del primer consorcio eléctrico fue necesario el impulso financiero del Deutsche Bank y el soporte tecnológico de la empresa Siemens, en su conjunto dio como resultado el nacimiento de Allgemeine Electricitäts-Gesell (AEG).

Las características territoriales de Alemania favorecieron la explotación del carbón para la alimentación de las plantas eléctricas. La región de Rin, considerada la zona de carbón más rica de toda Europa, ha sido proveedora de lignito y hulla (ambos tipos de carbones). El transcurso del siglo XIX fue dominado por el carbón, incluso, como menciona Von Hirschhausen (2018), la división de la nación germana en la República Federal y la República Demócrata no fueron impedimentos para conservar la estructura monopólica. Como resultado, durante 1950 y 1980 únicamente ocho proveedores estuvieron a cargo de la generación. Aunado a la dependencia fósil, el liderazgo de Alemania Occidental en investigación nuclear promovió esta fuente energética como elemento de la matriz energética. En la actualidad, para el año 2020 el 11.3% de electricidad germana proviene de plantas nucleares (Kern *et al*, 2022).

Siguiendo con la lupa del enfoque multinivel, a nivel macro se presentaron una serie de factores de largo plazo que incidieron sobre los cambios en la transformación energética. Durante los años de 1970, tal como señala Brunekreeft *et al.* (2016), la crisis del petróleo causó inconformidad en la sociedad alemana al sentirse vulnerable frente a las variaciones de precios y los episodios de escasez, por lo cual sentaron su confiabilidad en otras fuentes de energía como la nuclear.

Otro elemento crucial para el cambio de rumbo del sector fueron las presiones políticas sobre el desempeño energético de Alemania Occidental. Así lo apunta Von Hirschhausen (2018) quien recapitula el proceso de diálogo entre las autoridades políticas. A raíz de los trabajos del científico y ambientalista Amory Lovins durante 1970 comenzó una ola política en favor del medio ambiente. Particularmente, en 1975 el político Erhard Eppler criticó fuertemente las estructuras políticas de Alemania Occidental vaticinando una incompatibilidad entre su proyecto económico y el cuidado medioambiental. De tal manera, los partidos políticos ambientalistas se opusieron contra los efectos indirectos de la industria extractiva, la dependencia extranjera de la disminución del petróleo, el gas y las materias primas, las estructuras de mercado monopólicas, la contaminación del aire o del mar, la opresión de los pueblos indígenas, los accidentes nucleares y los desechos radiactivos y, más tarde, lucharon contra el cambio climático. Los opositores a la energía nuclear obtuvieron

mayorías o fuertes minorías en muchos parlamentos locales y nacionales

El esquema de producción se revirtió a finales durante 1980 influido fuertemente por la desregulación del sector eléctrico dentro del marco regulatorio de la Unión Europea. Al igual que en el esquema del Reino Unido, la trayectoria del sector energético se vio fuertemente influido por las reglas configuradas por la región. Sin embargo, el caso alemán resulta paradigmático al ganar autonomía gracias a la implementación de una estrategia radical que buscaba dejar de lado el consumo fósil y evitar desastres nucleares como Chernobyl de 1986.

Desde una perspectiva meso, el papel de las instituciones ha sido clave para los cimientos y desarrollo de la transformación energética de Alemania. Evidencia de ello la interpretación de Rechsteiner (2021) quien precisa, de manera similar en la evidencia de los casos internacionales mostrados, que el proceso de transición energética del sector eléctrico se debió el desempeño regulatorio e institucional en lugar de aspectos técnicos.

En efecto, *Energiewende* es un término germánico que han reproducido los expertos para referirse al conjunto de políticas que busca integrar a los distintos sectores de la economía a fin de disminuir las CO_2 , impulsar el desarrollo de energías renovables y reducir los riesgos de las fuentes tradicionales. Si bien este programa se considera el eslabón de la transición energética nacional, autores Hedberg (2017) afirman que los resultados demuestran que se ha centrado en la electricidad.

Morris y Pehnt (201), en una revisión histórica de la política energética, apunta que las bases del *Energiewende* se encuentran en las medidas implementadas desde los años de 1990. Es decir, el desempeño energético alemán es resultado de un esfuerzo iniciado 40 años atrás y logró consumarse hace 30 años. El cuadro 3.6 muestra los rasgos característicos del esfuerzo institucional hacia la adopción de fuentes renovables.

Cuadro 3.6. Principales reformas para el impulso de las energías renovables en Alemania

Año	Política	Características
1990	Ley sobre alimentación de energías renovables	Establecimiento del primer plan en energía renovable fijando un 5% de producción eléctrica proveniente de fuentes limpias impulsando la descentralización de la producción

1991	Ley de Transmisión de Energía Forzada	El principal instrumento es la tarifa FIT. Obliga a los operadores de la red a priorizar la compra de electricidad proveniente de fuente eólica y biomasa.
2001	Ley de Energía Renovable	Impulso de sistemas de alimentación y difusión de energías renovables, principalmente eólica y geotérmica. Creación de impuesto al consumo de energía contaminante para financiar nuevas inversiones. Establecimiento del cierre de plantas nucleares después de 32 años de funcionamiento. El gobierno proporciona subsidios a la inversión y préstamos bancarios. Se garantiza la tarifa FIT por 20 años a fin de eliminar el riesgo de inversión
2010	Energy Concept	Considerado el <i>Energiewende</i> , se establecen las metas de ECO2: i) Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con los niveles de 1990, en un 40 % para 2020, un 55 % para 2030, un 70 % para 2040 y un 80–95 % para 2050, ii) Aumentar la participación de energías renovables para la generación de electricidad al menos 38 % en 2020, 50 % en 2030, 67 % en 2040 y 80 % en 2050, y la participación de energías renovables en el consumo final de energía a al menos 30 % para 2030 y al menos el 60% para 2050, iii) Cierre de todas las plantas nucleares para 2022. iv) Establecimiento de estándares de eficiencia energética en los restos de sectores. V) Introducción de pequeños productores (familias, comunidades y comunidad empresarial de baja escala)
2011	Eliminación de energía nuclear	Se propone el cierre definitivo de las centrales nucleares a raíz del accidente en Fukushima, Japón. Se realizan foros abiertos a la población para contar con su opinión
2014	Ley de energía renovable 2.0	Determinación de la tarifa FIT a través de subastas. El debate comenzó por considerarse un mecanismo determinado de forma estatal. La región europea presionó fuertemente para la instauración de mecanismos de mercado en el sector eléctrico. Con ello se busca el control del despliegue de energías renovables y absorberlas gradualmente.
2017	Ley de energía renovable 3.0	Proceso de licitaciones pública para inversiones en energía eólica y fotovoltaica en lugar de tener como referencia la tarifa FIT. Incorpora la Ley del Mercado Eléctrico cuyo principal instrumento es el “peak shaving” busca evitar que la producción renovable se incorpore completamente a la red y tener picos. Actualmente la red sufre sobrecarga en ciertas regiones, por lo cual, intenta redistribuir a los productores (principalmente turbinas eólicas).

Fuente: Elaboración propia con base en Agora Energiewende (2019), Von Hirschhausen *et al.* (2018), Chen *et al.* (2019), Zhu y Wang (2020).

El desempeño de la transición energética del sector eléctrico en Alemania se ha dejado un saldo favorable. Para el 2021, el 39% de electricidad fue generada por energías renovables (AIE, 2022) siendo las tecnología eólica y fotovoltaica quienes cuentan con mayor despliegue en el territorio. De acuerdo con Egerer *et al.* (2018) entre 1990 y 2017, la participación de las energías renovables en la producción bruta de electricidad aumentó del 3,6 % al 36,3 %, la principal fuente de electricidad, por delante de los carbones lignito (22,5

%), la hulla (14,1 %), el gas natural (13,2 %), y energía nuclear (11,7%).

En cuanto a los participantes, el caso alemán resalta, al igual que el Reino Unido, por la integración de agentes de pequeña escala en la generación de electricidad resultado de una configuración de producción descentralizada. En el año 2017 (último dato disponible), el 43% de toda la capacidad renovable instalada en Alemania pertenece a los ciudadanos mientras el 16% corresponde al sector público.

El despliegue técnico de las fuentes renovables puede analizarse, recurriendo a la perspectiva Multinivel, desde los hechos que acontecen a nivel de nicho. Para ello, el trabajo de Rechsteiner (2008) señala que desde 1990 hasta inicios de la actual década la eficiencia de las tecnologías renovables, fotovoltaica y solar, incrementaron su eficiencia del 47%. En gran medida se debe a dos factores. El primero vinculado a la capacidad del capital humano para reducir la curva de aprendizaje de los ingenieros alemanes. Al respecto, Rechsteiner (2021) indica que el proceso de aprendizaje fue 23.5% más rápido que la media internacional, lo que ha permitido incrementar fuertemente la eficiencia de los generadores. El segundo aspecto fue la creación de un mercado internacional que permitió reducir el precio de los paneles proveídos principalmente de China.

Finalmente, el proceso de transición aún se enfrenta a una serie de tensiones. La Fundación Friedrich Ebert Stiftung (2021) señaló que existe fuertes resistencias al cierre de centrales de energía nuclear al presenciarse un grado de desconfianza ante las fuentes renovables como su vecino del sur España. Asimismo, Rechsteiner (2021) destaca que se trata de un proceso sin terminar principalmente por los problemas de congestión en la red a causa del ascenso de pequeños productores que utilizan las líneas de transmisión, haciendo del proceso de diversificación territorial un reto importante. Agora Energiewend (2019) destaca el reto presente que se trata de las tarifas del recibo eléctrico. Si bien el precio se mantiene estable, es el segundo más elevado de Europa después de Noruega. Esto es resultado, como se mostró en el cuadro 3.6, del impuesto que se cobra en el recibo particular para financiar las fuentes renovables. De esta forma, la Ley de energía renovable 3.0 busca cambiar la fuente de financiamiento de los nuevos proyectos eléctrico y cuyos resultados se esperan en el mediano plazo.

La figura 3.6 muestra el Modelo Multinivel Bioevolutivo para Alemania. Al igual que el caso británico, el país germano se enfrentó a condiciones iniciales (sombreado rojo) vinculadas a la dependencia de combustibles fósiles y el riesgo social de la energía nuclear. La crisis del petróleo de 1973 desató un proceso evolutivo en la sociedad cuya postura contra la industria extractiva y los desechos nucleares impulsó la agenda política de los partidos ecologistas.

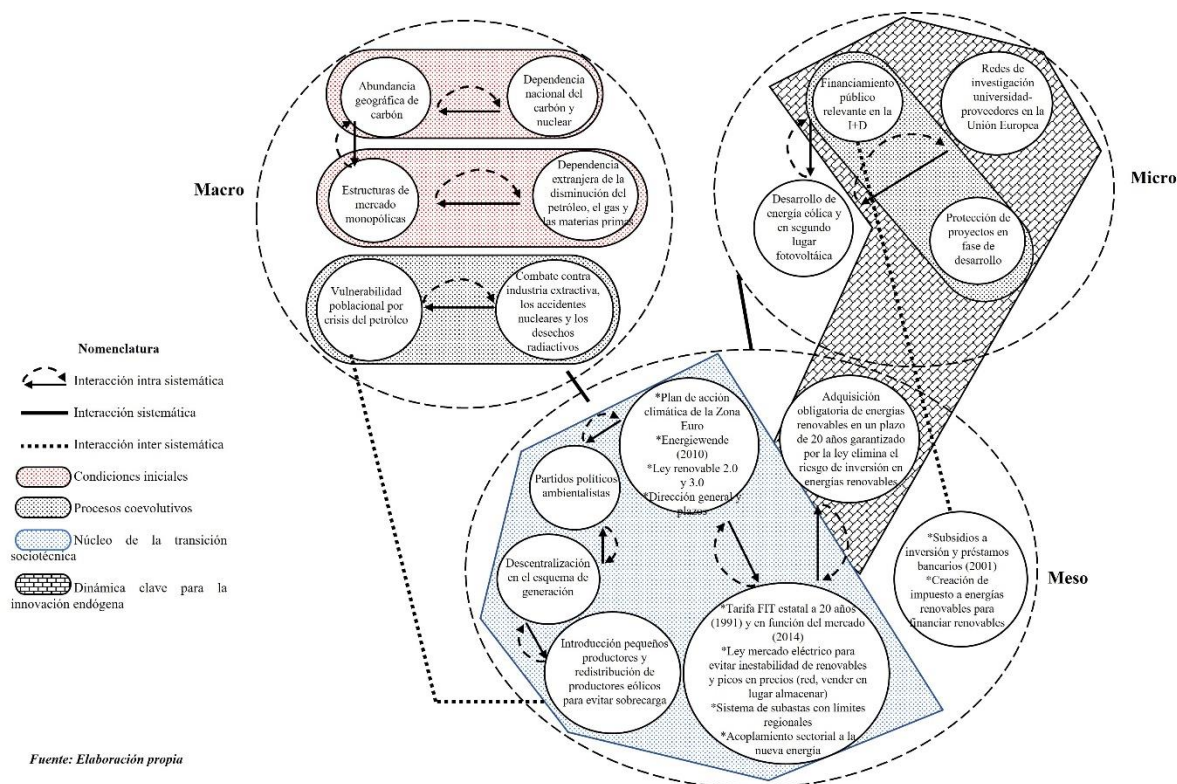
El caso alemán muestra una mejor coordinación de sus programas y agendas institucionales para la transición sociotécnica. A lo largo del apartado se ha mostrado el conjunto de políticas que se actualizan se manera frecuente con la finalidad de mantener la trayectoria de sustentabilidad. En concreto, el núcleo de la transición sociotécnica (sombreado azul) se ubica en la descentralización del mercado y la introducción de pequeños productores y comunidades energéticas; adicionalmente la implementación de tarifas FIT y certidumbre de inversiones, en términos de retornos económicos, por 20 años. Asimismo, la retroalimentación se complementa con el sistema de subastas, programa sectorial para que se consuma la energía producida y una reforma al mercado eléctrico para evitar episodios de inestabilidad en la red de transmisión.

A nivel micro, a diferencia del caso británico, se creó un proceso evolutivo donde el gobierno protegió los nuevos proyectos de energía renovable mientras se retroalimentó de altos gastos de I+D. Además, el proceso de innovación endógena (sombreado negro con textura de rayas) se complementó con la existencia de instituciones de investigación alemanas y de la Unión Europea. En términos de financiamiento, los impuestos a energías fósiles y los subsidios a préstamos bancarios permitieron la expansión de la energía eólica y fotovoltaica.

La transición sociotécnica británica y alemana tiene varias similitudes, sin embargo, las ventajas del caso germano es la estabilidad y continuidad de la trayectoria sustentable. La experiencia británica ha demostrado mayor nivel de desconfianza generada por el gobierno mientras en contraparte, el gobierno alemán se ha encargado de dar continuidad al proyecto comenzado en la década de 1990. Por estas razones, siguiendo la taxonomía de las transiciones, también se sitúa en transición eléctrica comunitaria de ida y vuelta. Sin

embargo, el Modelo Multinivel Bioevolutivo permite encontrar de forma detallada la diferencia. A pesar de pertenecer al mismo esquema de transición, el modelo es capaz de señalar los casos particulares. Alemania se diferencia por la estabilidad, la fortaleza en sus retroalimentaciones y procesos evolutivos. En términos entrópicos, muestra un desempeño favorable que lo coloca a la parte de Reino Unido respecto a la participación de electricidad renovable (gráfica 3.18).

Figura 3.6. Alemania. Modelo Multinivel Bioevolutivo de la transición sociotécnica



3.6.5 Estados Unidos

El sistema estadounidense de energía eléctrica es uno de los más complejos en su evolución y estructura. Dentro de los planes de recuperación económica impulsados por el gobierno de Franklin D. Roosevelt se incorporó el sector eléctrico. La plataforma de apoyo del New Deal impulsó la electrificación de las zonas rurales creando un modelo cooperativo de producción. Para 1938 se formaron 350 proyectos cooperativos apoyados por la Administración Federal de Electricidad Rural en 45 estados alcanzando para 1944 el 45 por % de cobertura en zonas

rurales y para 1953 la electrificación había llegado a todas las áreas rurales excepto a las más remotas (Greenberg y McKendry, 2021)

El tránsito hacia el desarrollo de un mercado desregulado comenzó en la década de 1970. La crisis del petróleo de 1973 incrementó los precios de la electricidad y en general el nivel de precios de la economía se elevó dejando en condiciones de vulnerabilidad a parte de la población creando una depresión de la demanda. Esto obligó a la construcción de centrales eléctricas que utilizaban combustibles domésticos de bajo costo, principalmente carbón (AIE, 2020). Para revertir esta situación, durante 1970 y 1980 se introdujeron reformas al sector público que fueron antecedentes al gran proceso de apertura de los años de 1990. Entre ellas, Hess (2011) destaca la Ley de Políticas de Regulación de Servicios Públicos de 1978 que obligó a las empresas del sector público a comprar electricidad a pequeñas centrales eléctricas, incluidas las energías renovables y la cogeneración. Esta medida fue el primer paso para reducir el monopolio natural.

Más adelante, en 1992 se aprobó la Ley de Política Energética donde se establecieron dos incentivos fiscales para la difusión de energías renovables y la descentralización del sistema eléctrico⁵⁶. El primero corresponde a créditos fiscales a la producción (PTC) del 2.3% por cada kilovatio/hora durante los primeros diez años de operación, mientras el segundo instrumento de crédito fiscal incentivó a la inversión (ITC) sobre las inversiones en producción combinada de calor y electricidad, microturbinas y energía geotérmica (Kota *et al.* 2019). Además, esta medida permitió la competencia entre generadores mayoristas y minoristas a la luz de la independencia de los Estados (Hess, 2014).

La ampliación del mercado eléctrico permitió el desarrollo de los productores independientes de energía e incentivó la competencia (Warwick 2002). De tal manera la conformación del sector eléctrico de Estados Unidos quedó configurado de la siguiente manera. Se compone de tres interconexiones a nivel nacional: la Interconexión del Oeste, la

⁵⁶ El proceso de desregulación se produjo en diversas industrias de la economía estadounidense, entre ellos la industria del gas. De acuerdo con Woollacott (2020) la caída del precio del gas natural durante 1980 y 1990 favoreció la desregulación del sector eléctrico puesto que se convirtió en un insumo barato y con gran disponibilidad.

Interconexión del Este y la Interconexión del Consejo de Fiabilidad Eléctrica de Texas. En cada interconexión existen centros de control que se encargan de equilibrar la generación respecto a la demanda. Al mismo tiempo la North American Electric Reliability Corporation y la Comisión Reguladora de Energía se encargan de establecer las condiciones de operación del mercado mayorista y minorista, simultáneamente se encargan de garantizar la seguridad de la red.

La estructura de producción se distribuye en 5 actores. De acuerdo con Flores *et al* (2017) son:

- 1) Servicios públicos de propiedad pública. Son propiedad de la comunidad local y son operados por los gobiernos locales que se encargan de la generación, transmisión y distribución de electricidad en sus territorios.
- 2) Cooperativas eléctricas. Son cooperativas de distribución que se encargan de adquirir energía eléctrica a comunidades generadoras o empresas del servicio público. Dependiendo del estado, las cooperativas pueden enfrentar diferentes niveles de supervisión regulatoria por parte de las comisiones de servicios públicos/servicios públicos (Greenberg y McKendry, 2021).
- 3) Servicios públicos propiedad de inversores. Corresponde a empresas de propiedad privada de inversores.
- 4) Comercializadores de energía. Hace referencia a los agentes que compran y venden electricidad sin necesidad de poseer instalaciones.

Como resultado de la configuración del mercado, la generación de electricidad se segmentó el mercado en mayoristas y minoristas. El objetivo de los mercados mayoristas de electricidad es aumentar la eficiencia del sistema eléctrico sin comprometer su confiabilidad (IEEE, 2019). Estos mercados se caracterizan por estar controlados por el operador central en la región y se basan en subastas diarias por hora de electricidad.

Los primeros estados en poner a prueba este esquema fueron California y New Hampshire durante los años de 1990. En el caso de California el esquema mayorista fracasó debido a la falta de precios máximos. De acuerdo con Basseches *et al.* (2022) la intermitencia de los insumos junto a la ausencia de un precio límite, los productores mayoristas elevaron

el precio a un nivel sin precedentes. Frente a ello, los hogares vieron se enfrentaron a la imposibilidad de realizar los pagos, por lo cual, la demanda por la electricidad se cayó y las empresas dejaron de producir.

La apuesta por un mercado desregulado se ha basado en dos elementos: eficiencia, seguridad y disminución de ECO₂. Respecto al primer punto, con objetivo de evitar casos como el de California, se ha instalado un esquema de precios basado en los costos de producción de la unidad marginal más un costo asociado a pérdidas de transmisión. De esta manera, es posible construir una oferta de curva estable y así las agencias operadoras en cada región permite equilibrar la oferta y demanda (Gottschamer y Zhang, 2020).

En el caso de la seguridad, de acuerdo con Flores *et al.* (2017) el caso de California y apagones frecuentes en estados dominados por un esquema mayorista hizo que la percepción de la población fuera negativa y exigieron el acceso a proveedores minoristas. De esta manera, los principales productores de energía renovable recibieron un voto de confianza para hacerse presente en 14 estados de la nación Norteamérica.

Respecto a las exigencias medioambientales, durante al menos la última década el sector eléctrico estadounidense adoptó una variedad de políticas para fomentar la inversión en energía eólica y solar. Como se apuntó inicialmente, en 1992 la Ley de Política Energética otorgó créditos fiscales a la producción y la inversión. Aunado a ello, las autoridades se plantearon como objetivo reducir las emisiones de efecto invernadero en el rango de 17% por debajo de los niveles de 2005 para 2020 y 26-28% por debajo de los niveles para 2025. (US Department of Energy, 2017).

Ameyaw *et al.* (2021) identifican como elemento clave para el desarrollo de energía renovable en Estados Unidos es el financiamiento. Junto al PTC e ITC se implementó un Programa de Prestamos dependiente del Departamento de Energía. El diseño del programa se enfocó especialmente al gasto de I+D, desarrollo de tecnologías de energía renovable y producción y almacenamiento de energía renovable.

Otras medidas adicionales son los subsidios otorgados por la Ley de Recuperación y Reinversión. Estos son pagos en efectivo, en lugar de créditos, ofrecidos a desarrolladores de energía renovable equivalentes al 30 % del total de costo. En concordancia, el Programa de

Depreciación del Sistema de Recuperación de Costos Acelerado Modificado es un incentivo federal que proporciona un programa de depreciación acelerada de cinco años para todas las instalaciones renovables elegibles y grandes proyectos eólicos.

Estas condiciones generales han incitado a los gobiernos estatales para establecer metas ambiciosas de generación eléctrica renovable. En el caso de California durante 2018 se impulsó un programa agresivo para que los productores minoristas vendan el 100% de electricidad proveniente de energías renovables (Ameyaw *et al.* 2021).

Como resultado del impulso de las fuentes renovables en 2020 el sector se integró en 60.9% por empresas de servicios públicos, 26.5% corresponde a las cooperativas 26,5%, las comercializadoras de energía representan el 6,4%, los servicios públicos propiedad de inversores son el 5.8% (US Department of Energy, 2020). Desglosando la clasificación se tiene a 3300 proveedores donde la capacidad de generación eléctrica de gas natural domina con el 43%, las energías renovables representan el 24%, el carbón con el 21% y el petróleo con 0.6% (EIA, 2021). Es decir, los combustibles fósiles dominan el sector con el 64.6%

A pesar de los esfuerzos, la transición energética en el sector estadounidense ha ido frenando. De acuerdo con Hakam (2018) y Chen *et al.* (2022) el impulso de las renovables va perdiendo fuerza al mostrar una tendencia a la baja durante 2015 a 2018. Existen varios factores que inciden en ello, el más importante es la abundancia de gas natural relativamente barato y de precios muy competitivos (Woollacott, 2020). Esto es en gran parte el resultado de la evolución de las tecnologías de perforación (como la fracturación hidráulica) que han aumentado el acceso a los suministros.

Finalmente, los créditos fiscales previamente disponibles para las instalaciones renovables están programados para expirar, al tiempo que los proyectos de energía renovable que dependen de las interconexiones con la red de transmisión pueden enfrentar barreras de entrada debido al gasto y la demora regulatoria asociados con el desarrollo y la interconexión con las nuevas líneas (US Department of Energy, 2020)

La figura 3.7 muestra el proceso transición sociotécnica a través del modelo multinivel bioevolutivo. De manera similar a los países previos, la crisis del petróleo durante los años 70's fue una situación disruptiva que cuestionó fuertemente el régimen basado en

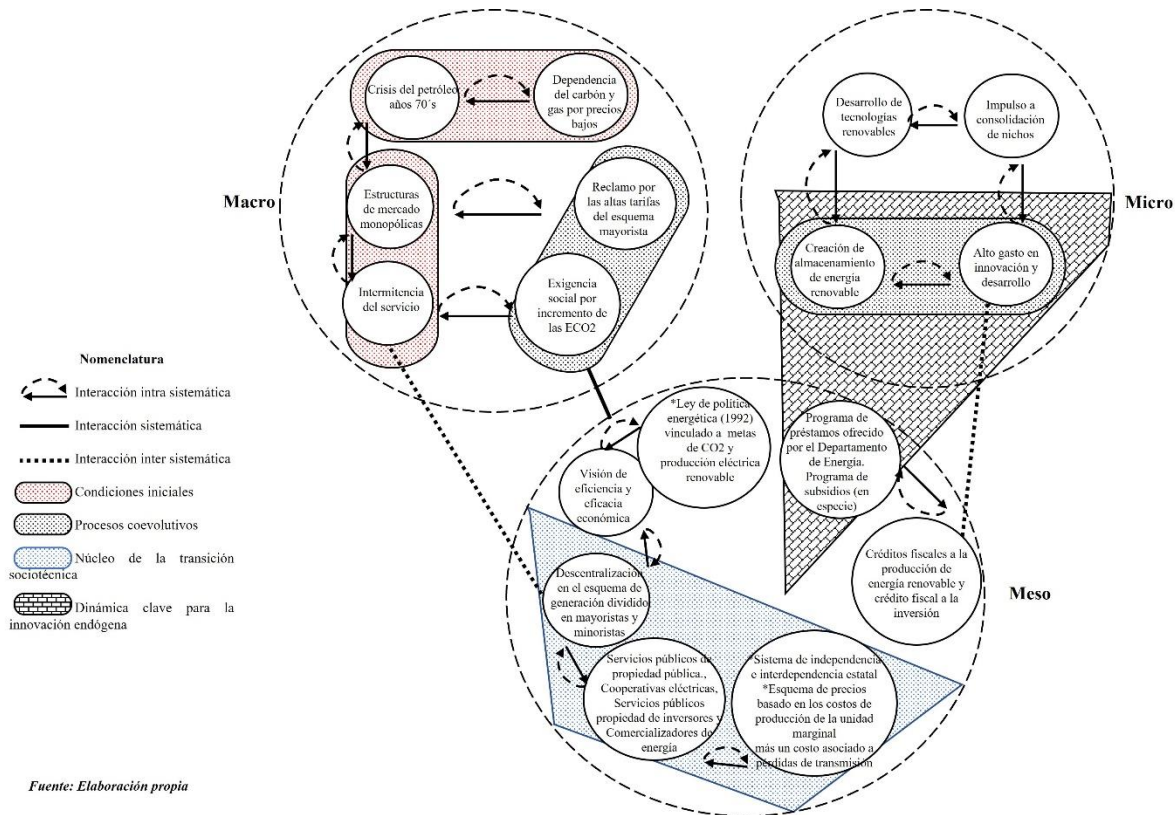
combustibles fósiles (condiciones iniciales) y las altas tarifas a causa del esquema mayorista de electricidad. Este proceso coevolutivo condujo a una reforma en el mercado eléctrico. A diferencia que los países europeos, el esquema eléctrico sustentó su dinámica en la liberalización plena. Las autoridades del gobierno se limitaron a garantizar las condiciones mínimas de funcionamiento.

El núcleo de la transición sociotécnica (sombreado azul), como se ha señalado, descansa en la descentralización del esquema mayorista permitiendo así la integración de generadores minoristas. Con ello se buscó terminar la intermitencia del servicio intermitencia del servicio (sombreado rojo) y reducir los costos en las tarifas. Adicionalmente, en el espacio meso se configuraron arreglos que impulsaron la dinámica de la transición tal como la independencia para que cada estado tuviera metas de ECO₂ y un esquema de precios de producción basado en la unidad marginal.

Respecto a la dinámica endógena de la innovación (sombreado negro con textura de rayas) existe procesos de coevolución claves. Destaca el plan de préstamos en especie para los proyectos en energía renovable que impulsó el gasto en I+D, lográndose conjugar con los proyectos estatales de almacenamiento energético. En conjunto con el alto nivel de capacidades tecnológicas y la existencia de derramas de conocimiento locales se consolidó el empuje de nichos de electricidad renovable.

A diferencia de los casos previos, la transición sociotécnica de Estados Unidos se implementa bajo términos de eficiencia y eficacia, por lo cual, el gobierno y las autoridades energéticas se limitan a establecer las condiciones mínimas de funcionamiento junto. Como resultado, la ausencia de mecanismos gubernamentales representa las principales barreras a la sustentabilidad energética del sector eléctrico.

Figura 3.7. Estados Unidos. Modelo Multinivel Bioevolutivo de la transición sociotécnica



Siguiendo la taxonomía de la transición, el caso estadounidense se engloba en la *transición eléctrica de descentralización variada*. En términos entrópicos es la de menor reducción del impacto ambiental pues se prioriza la estabilidad energética y precios al consumidor. Si bien la proporción de energía renovables de China (gráfica 3.15), India (gráfica 3.16) y Estados Unidos (gráfica 3.19) ronda entre el 9% y 12% del total, las trayectorias son diferenciadas. En el caso de China se trata de un proceso gradual dirigido por el gobierno que ha dado resultados deseables en los últimos 25 años, mientras el caso de India se enfrenta a barreras estructurales como la pobreza, falta de capacidades tecnológicas y la cultura energética. Finalmente, la situación estadounidense se trata de una estrategia consolidada de media intensidad por dirigir la trayectoria del sector eléctrico hacia la sustentabilidad priorizando aspectos de eficiencia y estabilidad de la red de transmisión.

3.7 Taxonomía de la transición: límites, barreras y lecciones para México hacia la producción renovable

Gracias a la aplicación del Modelo Multinivel Bioevolutivo además de identificar el núcleo de la transición sociotécnica, retroalimentaciones, procesos coevolutivos, innovación endógena y condiciones iniciales, es posible distinguir los impulsos y límites que se enfrentan los sistemas eléctricos internacionales, clasificando su importancia a nivel micro, meso y macro. El cuadro 3.6 muestra desglosa bajo los cuales podría garantizarse un esquema de transición exitosa con base en la evidencia de China, India, Reino Unido, Alemania y Estados Unidos.

En general, *a nivel micro* se detectan los elementos que impulsa la creación de nichos. Destacan los planes de apoyo para pequeños productores, comunidades energéticas y empresas. Se resalta el papel de las capacidades de absorción del conocimiento formal potenciado sea por presupuesto público y privado, las redes de colaboración local e internacional, protección de proyectos en su etapa inicial y el liderazgo del gobierno para crear los procesos coevolutivos a nivel de nicho. Los retos a los que se enfrentan devienen principalmente a la falta de coordinación, la localización geográfica, el tiempo de maduración de la tecnología respecto a sus niveles de retorno debido a la dependencia de tecnologías que transforma energía fósil y la falta de capacidades tecnológicas

El espacio más importante para la transición sociotécnica es el *meso* debido a la presencia no sólo de factores técnicos sino institucionales y regulatorios. La transición se potencia principalmente por la visión del gobierno en turno respecto a las energías renovables. Los instrumentos más destacados son la descentralización del mercado eléctrico, introducción de pequeños productores al esquema nacional de electricidad, financiamiento de proyectos, la coordinación de la banca regional, subvenciones fiscales, certidumbre a inversiones entre 10 y 20 años, la demanda de electricidad renovable en distintos sectores de la economía, los esquemas de tarifas en el corto y largo plazo, instrumentos como la tarifa FIT así como el estímulo a las actividades tecnológicas y gasto en I+D.

Además, un actor relevante es la flexibilidad institucional y gobernanza para el reconocimiento de múltiples actores en el sistema de producción tanto en las condiciones de

competencia y su reconocimiento legal. Como principales obstáculos se encuentran la inexperiencia de la banca regional, la mala localización de los proyectos renovables, la rigidez de la cultura energética para aceptar el cambio, factores de demanda de los hogares y la postura política del partido político en el poder que prioriza el uso de fuentes fósiles debido a su costo, disponibilidad y seguridad.

Finalmente, *los factores macro* son aquellos asociados a las condiciones iniciales a las que se enfrenta cualquier transición. En primer lugar, la dependencia de energías fósiles edificó un mercado eléctrico ineficiente y con niveles elevados de endeudamiento. Asimismo, existen procesos coevolutivos donde la sociedad percibe el riesgo de las energías fósiles y exige condiciones de seguridad energética. Otros factores son la presencia de precios bajos en fuentes fósiles, el bajo nivel de ingresos de los hogares, las variaciones internacionales de precios a futuros de los energéticos y la resistencia frente a la pérdida de empleos de sectores como el carbón y petróleo generan presiones en el paisaje.

Cuadro 3.7. Principales impulsos y barreras a la transición energética en el sector eléctrico internacional desde la perspectiva del Modelo Multinivel Bioevolutivo

Escala	Micro
Impulsos	Conocimiento formal
	Economías de escala y protección de proyectos en etapas iniciales
	Derramas de conocimiento local y extranjeras
	Derramas de la inversión extranjera (colaboración con el extranjero)
	Papel del gobierno para compras obligatorias de energía eléctrica renovable
	Apertura del mercado a las cooperativas y participación de micro-pequeños productores
	Integración de los hogares en el autoabastecimiento
	Programa de subsidios, I+D pública y privada
	Preferencia a pequeños productores con capacidad de 5 GW o menos
Barreras	Nivel educativo y absorción del conocimiento
	Incertidumbre sobre nuevas tecnologías
	Falta de coordinación entre nichos
	Desconfianza de la población
	Falta de experiencia y poca flexibilidad de las rutinas productivas
	Dependencia tecnológica hacia esquemas de energía eléctrica de origen fósil

Escala	Meso
Impulsos	Coordinación políticas estatales, regionales y nacionales
	Programas estatales y federales con metas claras para la descarbonización
	Coordinación banca regional y estatal
	Incentivos a la demanda doméstica de energía eléctrica renovable
	Mecanismos de créditos a producción e inversión
	Expansión de mercado
	Cabildeo político
	Política de patentamiento
	Sistemas de subastas de energía renovable
	Incentivos fiscales y financiamiento de nuevos proyectos vía impuestos al sector de energía fósil
	Certidumbre a los inversionistas
	Integración al esquema de ganancias de pequeños productores
	Tarifas de interconexión FIT
	Compras obligatorias de la energía eléctrica renovable
Tasas de retorno garantizadas a 20 y 25 años	
Barreras	Exclusión de terratenientes en el esquema de ganancias de eólicas
	Costos iniciales de inversión
	Falta de mecanismos de financiamiento para pequeños productores
	Coordinación institucional en la implementación de las reglas y normas
	Inestabilidad de energía eléctrica renovable
	Deficiente infraestructura pública y gasto en I+D
	Falta de seguimiento de los proyectos
Barreras	Acusaciones de dumping por parte de competidores internacionales
Escala	Macro
Impulsos	Variaciones de precios de las fuentes fósiles de energía
	Precio de la tecnología renovable
	Nivel de ingresos
	Altas reservas de fuentes energéticas
	Condiciones climáticas favorables
	Adaptación de la cultura energética a las nuevas fuentes energética
Barreras	Pobreza energética

	Falta de conocimientos técnicos
	Resistencia comunitaria
	Cosmovisión del servicio eléctrico como gratuito
	Carencia de alfabetización tecnológica
	Pérdida de empleos e ingresos durante la descarbonización
	Falta de almacenamiento de la energía solar
	Dependencia de la economía a insumos fósiles
	Dependencia fiscal de los ingresos provenientes del carbón
	Bajos precios del gas natural
	Crisis económica y distorsión de los precios de productores mayoristas

Fuente: Elaboración propia

Bibliografía

1. Acharya, R. H., y Sadath, A. C. (2017). Implications of energy subsidy reform in India. *Energy Policy*, 102, 453-462.
2. Andrews-Speed, P. (2012). *The governance of energy in China: Transition to a low-carbon economy*. Springer.
3. Aggeri, F., y Cartel, M. (2017). Le changement climatique et les entreprises: enjeux, espaces d'action, régulations internationales. *Entreprises et histoire*, (1), 6-20.
4. Aklin, M., y Urpelainen, J. (2018). *Renewables: The politics of a global energy transition*. MIT Press.
5. Ameyaw, B., Li, Y., Ma, Y., Agyeman, J. K., Appiah-Kubi, J., y Annan, A. (2021). Renewable electricity generation proposed pathways for the US and China. *Renewable Energy*, 170, 212-223.
6. Anani, N. (2019). *Renewable energy technologies and resources*. Artech House.
7. Antonelli, C. (2017). *Endogenous innovation: The economics of an emergent system property*. Edward Elgar Publishing.
8. Balzani, V. (2019). Saving the planet and the human society: renewable energy, circular economy, sobriety. *Substantia*, 3(2), 9-15.
9. Bardhan, R., Debnath, R., y Jana, A. (2019). Evolution of sustainable energy policies

- in India since 1947: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 8(5), e340.
10. Basseches, J. A., Bromley-Trujillo, R., Boykoff, M. T., Culhane, T., Hall, G., Healy, N., ... y Stephens, J. C. (2022). Climate policy conflict in the US states: a critical review and way forward. *Climatic Change*, 170(3-4), 32.
 11. Bernstein, T., y Reynolds, T. S. (1978). Protecting the Royal Navy from Lightning-William Snow Harris and His Struggle with the British Admiralty for Fixed Lightning Conductors. *IEEE Transactions on Education*, 21(1), 7-14.
 12. Bhushan, C., Banerjee, S., y Agarwal, S. (2020). Just Transition in India: An inquiry into the challenges and opportunities for a post-coal future.
 13. Bilgili, F., Koçak, E., y Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO2 emissions: a revisited Environmental Kuznets Curve approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 838-845.
 14. Bleicher, A., y Pehlken, A. (Eds.). (2020). *The material basis of energy transitions*. Academic Press.
 15. Boyce, M. (2001). *Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants*. American Society of Mechanical Engineers
 16. Brunekreeft, G., Buchmann, M., y Meyer, R. (2016). The rise of third parties and the fall of incumbents driven by large-scale integration of renewable energies: the case of Germany. *The Energy Journal*, 37(2_suppl), 243-262.
 17. Cao, X., Wen, Z., Zhao, X., Wang, Y., y Zhang, H. (2020). Quantitative assessment of energy conservation and emission reduction effects of nationwide industrial symbiosis in China. *Science of the Total Environment*, 717, 137114.
 18. Carter, N., y Jacobs, M. (2014). Explaining radical policy change: the case of climate change and energy policy under the British labour government 2006–10. *Public Administration*, 92(1), 125-141.
 19. Chen, H., Shi, Y., y Zhao, X. (2022). Investment in renewable energy resources, sustainable financial inclusion and energy efficiency: A case of US economy. *Resources Policy*, 77, 102680.

20. Chen, C., Xue, B., Cai, G., Thomas, H., y Stückrad, S. (2019). Comparing the energy transitions in Germany and China: Synergies and recommendations. *Energy reports*, 5, 1249-1260.
21. Childe, V. G. (1988). *Evolución social* (Vol. 29). Plaza y Valdes.
22. Conchado Rodríguez, A. (2017). Energy innovation policy: in response to global challenges and the quest for sustainable prosperity. Tesis doctoral disponible en <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/26424>
23. Crutzen, P. J. (2002). The “anthropocene”. In *Journal de Physique IV (Proceedings)* (Vol. 12, No. 10, pp. 1-5). EDP sciences.
24. Crutzen, P., y Stoermer, E. F. (2000). Have we entered the “Anthropocene”. *International Geosphere-Biosphere Program Newsletter*, 41, 17-18.
25. Cunningham, H. (2016). *Leisure in the Industrial Revolution: C. 1780-c. 1880*. Routledge.
26. Defeuilley, C. (2019). Energy transition and the future (s) of the electricity sector. *Utilities Policy*, 57, 97-105.
27. Demoule, J. P. (2017). The transitions between Neolithic and Early Bronze Age in Greece, and the “Indo-European problem”. In *Balkan Dialogues* (pp. 52-63). Routledge.
28. Demski, C., Thomas, G., Becker, S., Evensen, D., y Pidgeon, N. (2019). Acceptance of energy transitions and policies: Public conceptualisations of energy as a need and basic right in the United Kingdom. *Energy Research y Social Science*, 48, 33-45.
29. Dimitrov, R., Hovi, J., Sprinz, D. F., Sælen, H., y Underdal, A. (2019). Institutional and environmental effectiveness: Will the Paris Agreement work?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(4), e583.
30. Eastin, J. (2018). Climate change and gender equality in developing states. *World Development*, 107, 289-305.
31. Egerer, J., Oei, P. Y., y Lorenz, C. (2018). Renewable energy sources as the cornerstone of the German Energiewende. *Energiewende" Made in Germany" Low*

Carbon Electricity Sector Reform in the European Context, 141-172.

32. Elshurafa, A. M., Farag, H. M., y Hobbs, D. A. (2019). Blind spots in energy transition policy: Case studies from Germany and USA. *Energy Reports*, 5, 20-28.
33. Erenoğlu, A. K., Erdinç, O., y Taşçıkaraoğlu, A. (2019). History of Electricity. In *Pathways to a Smarter Power System* (pp. 1-27). Academic Press.
34. Foster, D. R., y Aber, J. D. (2004). *Forests in time: the environmental consequences of 1,000 years of change in New England*. Yale University Press.
35. Foxon, T. J., Hammond, G. P., y Pearson, P. J. (2020). Socio-technical transitions in UK electricity: part 1—history, actors and pathways. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 173(3), 109-122.
36. Foxon, T. J., Hammond, G. P., y Pearson, P. J. (2020). Socio-technical transitions in UK electricity: part 2—technologies and sustainability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 173(3), 123-136.
37. Galan, M. (2021). Role of product standards in the acceleration of the Indian energy transition: The case of the Indian off-grid solar sector. *Global Transitions*, 3, 89-98.
38. Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard university press.
39. Goudsblom J. 1992 *Fire and civilization* . London, UK: Penguin
40. Goudsblom, J. (2012). Energy and civilization. *International Review of Sociology*, 22(3), 405-411.
41. Gottschamer, L., y Zhang, Q. (2020). The dynamics of political power: The socio-technical transition of California’s electricity system to renewable energy. *Energy Research y Social Science*, 70, 101618.
42. Greenberg, E., y McKendry, C. (2021). Contested power: Energy democracy and the repoliticization of electricity in the western US. *Energy Research y Social Science*, 73, 101942.
43. Griliches, Z. (2007). *RyD and productivity: The econometric evidence*. University of Chicago Press.
44. Grubb, M., y Newbery, D. (2018). UK electricity market reform and the energy

- transition: Emerging lessons. *The Energy Journal*, 39(6), 1-26.
45. Hakam, D. (2018). Market power modelling in electricity market: A critical review. *International journal of energy economics and policy*, 8(5), 347-356.
46. Hanley, N., y Owen, A. D. (2004). *The economics of climate change*. Routledge.
47. Hedberg, A. (2017). Germany's energy transition: making it deliver. EPC Discussion Paper, 9 October 2017. Disponible en <http://aei.pitt.edu/91830/>
48. Hess, D. J. (2011). Electricity transformed: Neoliberalism and local energy in the United States. *Antipode*, 43(4), 1056-1077.
49. Hess, D. J. (2014). Political ideology and the green-energy transition in the United States. *Routledge Handbook of Science and Technology Studies*, 277-291.
50. Hovi, J., Skodvin, T., y Andresen, S. (2003). The persistence of the Kyoto Protocol: why other Annex I countries move on without the United States. *Global Environmental Politics*, 3(4), 1-23.
51. Inderberg, T. H. J., Tews, K., y Turner, B. (2018). Is there a prosumer pathway? Exploring household solar energy development in Germany, Norway, and the United Kingdom. *Energy Research y Social Science*, 42, 258-269.
52. Islam, S.N., and J. Winkel. 2017. Climate Change and Social Inequality. DESA Working Paper 152. Department of Economic y Social Affairs, United Nations.
53. IRENA (2021) Renewable Power Generation Costs in 2020. Disponible en <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
54. Janardhanan, N. (2021). Leveraging Co-innovation Model for Energy Transition: Examining India's Engagement with Japan and China. *Renewable Energy Transition in Asia: Policies, Markets and Emerging Issues*, 21-40.
55. Kale, V. V. (2017). Energy management and commercialisation for renewable energy sources in India. *International Journal for Scientific Research and Development*, 116-121.
56. Kern, F., Kuzemko, C., y Mitchell, C. (2014). Measuring and explaining policy paradigm change: the case of UK energy policy. *Policy y politics*, 42(4), 513-530

57. Kim, Y., Tanaka, K., y Matsuoka, S. (2020). Environmental and economic effectiveness of the Kyoto Protocol. *Plos one*, 15(7), e0236299.
58. Kern, F., Peuckert, J., Lange, S., Ahmann, L., Banning, M., y Lutz, C. (2022). Designing effective and acceptable policy mixes for energy transitions: Countering rebound effects in German industry. *Energy Research y Social Science*, 90, 102680.
59. King, A. D., y Harrington, L. J. (2018). The inequality of climate change from 1.5 to 2 C of global warming. *Geophysical Research Letters*, 45(10), 5030-5033.
60. Kompella, L. (2022). The transition of a socio-technical system to a smart grid: illustrated with the Indian electricity network. *International Journal of Energy Sector Management*, 16(3), 545-563.
61. Kryzhanovsky, L. (1989). Mapping the history of electricity. *Scientometrics*, 17(1-2), 165-170.
62. Labussière, O., y Nadaï, A. (2018). Energy Transitions. *A Socio-technical Inquiry*. Cham: Palgrave Macmillan.
63. Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R. T., Haines, A., y Ramanathan, V. (2019). Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7192-7197.
64. Lenzen, M., Li, M., Malik, A., Pomponi, F., Sun, Y. Y., Wiedmann, T., ... y Yousefzadeh, M. (2020). Global socio-economic losses and environmental gains from the Coronavirus pandemic. *PloS one*, 15(7), e0235654.
65. Levidow, L., y Raman, S. (2020). Sociotechnical imaginaries of low-carbon waste-energy futures: UK techno-market fixes displacing public accountability. *Social studies of science*, 50(4), 609-641.
66. Li, L., y Taeihagh, A. (2020). An in-depth analysis of the evolution of the policy mix for the sustainable energy transition in China from 1981 to 2020. *Applied Energy*, 263, 114611.
67. Li, F., y Pye, S. (2018). Uncertainty, politics, and technology: Expert perceptions on energy transitions in the United Kingdom. *Energy research y social science*, 37, 122-250

68. Lindsey, R., y Dahlman, L. (2020). Climate change: ocean heat content. *Climate. gov, August, 17*.
69. Mahapatra, D., Sindhi, S., y Tripathy, A. (2021). India's Renewables Commitments: A Political Risk Assessment. *Renewable Energy Transition in Asia: Policies, Markets and Emerging Issues*, 41-60.
70. Malhi, Y. (2017). The concept of the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources, 42*, 77-104.
71. Meadows, D.. (1972). The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York :Universe Books
72. Meyer, H. (1971). *A history of electricity and magnetism*. Burndy Library
73. Mitchell, C., y Connor, P. (2004). Renewable energy policy in the UK 1990–2003. *Energy policy, 32*(17), 1935-1947.
74. Moallemi, E. A., de Haan, F., Kwakkel, J., y Aye, L. (2017a). Narrative-informed exploratory analysis of energy transition pathways: A case study of India's electricity sector. *Energy Policy, 110*, 271-287.
75. Moallemi, E. A., Aye, L., Webb, J. M., de Haan, F. J., y George, B. A. (2017b). India's on-grid solar power development: Historical transitions, present status and future driving forces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69*, 239-247.
76. Mokyr, J. (1985). The industrial revolution and the new economic history. *The economics of the industrial revolution*. Rowman y Littlefield.
77. Moráquez, A. (2006). El desarrollo de la electricidad y el electromagnetismo y su repercusión social. *Luz, 5*(2), 1-1.
78. Morris, C., y Pehnt, M. (2012). La transición energética alemana, La Energiewende alemana. *Fundación Heinrich Böll, noviembre*, 3-6.
79. Mulvaney, D., (2020). Energy Transitions. *Sustainable Energy Transitions: Socio-Ecological Dimensions of Decarbonization*, 1-32.

80. Munir, Q., Lean, H. H., y Smyth, R. (2020). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in the ASEAN-5 countries: A cross-sectional dependence approach. *Energy Economics*, 85, 104571.
81. Newell, P. (2021). *Power shift: The global political economy of energy transitions*. Cambridge University Press.
82. Nieto, J., Carpintero, Ó., y Miguel, L. J. (2018). Less than 2 °C? An economic-environmental evaluation of the Paris Agreement. *Ecological Economics*, 146, 69-84.
83. Palmer, G., y Floyd, J. (2020). *Energy storage and civilization: a systems approach*. Springer Nature.
84. Peake, S. (2021). *Renewable Energy: Ten Short Lessons*. JHU Press.
85. Penna, A. N. (2019). *A History of Energy Flows: from human labor to renewable power*. Routledge.
86. Poveda-Ramos, G. (2003). La electricidad antes de Faraday. Parte 1. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (30), 130-147.
87. Qimin, C., Sha, F., y Xinyuan, W. (2020). Modeling the implementation of NDCs and the scenarios below 2° C for the Belt and Road countries. *Ecosystem Health and Sustainability*, 6(1), 1766998.
88. Radanne, P. (2006). Changement climatique et société (s). *Écologie y politique*, (2), 95-115.
89. Rahman, M. M. (2020). Environmental degradation: The role of electricity consumption, economic growth and globalisation. *Journal of environmental management*, 253, 109742.
90. Renaldi, R., Hall, R., Jamasb, T., y Roskilly, A. P. (2021). Experience rates of low-carbon domestic heating technologies in the United Kingdom. *Energy Policy*, 156, 112387.
91. Raja, A. K., y Srivastava, A. P. (2006). *Power plant engineering*. New Age International.
92. Rechsteiner, R. (2008). Wind power in context—A clean revolution in the energy sector. *Energy Watch Group*, 12.

93. Rechsteiner, R. (2021). German energy transition (Energiewende) and what politicians can learn for environmental and climate policy. *Clean technologies and environmental policy*, 23, 305-342.
94. Rees, W. E. (2020). Ecological economics for humanity's plague phase. *Ecological Economics*, 169, 106519.
95. Rosas, G. (2021). (2021). Los retos del sector eléctrico mexicano frente a la transición energética internacional. *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, 14(31), 37.
96. Reno, J. (2011). Motivated markets: instruments and ideologies of clean energy in the United Kingdom. *Cultural anthropology*, 26(3), 389-413.
97. Saint Akadiri, S., Alola, A. A., Olasehinde-Williams, G., y Etokakpan, M. U. (2020). The role of electricity consumption, globalization and economic growth in carbon dioxide emissions and its implications for environmental sustainability targets. *Science of The Total Environment*, 708, 134653.
98. Sarangi, G. K., Mishra, A., Chang, Y., y Taghizadeh-Hesary, F. (2019). Indian electricity sector, energy security and sustainability: An empirical assessment. *Energy Policy*, 135, 110964
99. Sinn, H. W. (2012). *The green paradox: a supply-side approach to global warming*. MIT press
100. Smil, V. (2010). *Energy Transitions: History, Requirements. Prospects*.
101. Smil, V. (2017). *Energy: a beginner's guide*. Simon and Schuster
102. Smil, V. (2019). *Energy in world history*. Routledge.
103. Upham, P., Bögel, P., y Johansen, K. (2019). *Energy transitions and social psychology: A sociotechnical perspective*. Routledge.
104. Usher, B. (2019). *Renewable energy: A primer for the twenty-first century*. Columbia University Press.
105. Valentine, S., Sovacool, B., y Brown, M. (2019). *Empowering the great energy transition: Policy for a low-carbon future*. Columbia University Press.

106. Von Hirschhausen, C. (2018). German energy and climate policies: a historical overview. *Energiewende" Made in Germany" Low Carbon Electricity Sector Reform in the European Context*, 17-44.
107. Wang, Y., Zhang, D., Ji, Q., y Shi, X. (2020). Regional renewable energy development in China: A multidimensional assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109797
108. Warde, P., Robin, L., y Sörlin, S. (2018). *The environment: A history of the idea*. JHU Press.
109. Warwick, W. M. (2002). *A primer on electric utilities, deregulation, and restructuring of US electricity markets* (No. PNNL-13906). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
110. Westwick, D. (Ed.). (2007). *Power Plants and Power Systems Control 2006: A Proceedings Volume from the IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control, Kananaskis, Canada, 2006*. Elsevier.
111. Wierling, A., Schwanitz, V. J., Zeiß, J. P., Bout, C., Candelise, C., Gilcrease, W., y Gregg, J. S. (2018). Statistical evidence on the role of energy cooperatives for the energy transition in European countries. *Sustainability*, 10(9), 3339.
112. Woollacott, J. (2020). A bridge too far? The role of natural gas electricity generation in US climate policy. *Energy Policy*, 147, 111867.
113. Wrangham, R. (2009). *Catching fire: how cooking made us human*. Basic books.
114. Yan, Q., Wang, Y., Baležentis, T., y Streimikiene, D. (2019). Analysis of China's regional thermal electricity generation and CO2 emissions: decomposition based on the generalized Divisia index. *Science of the Total Environment*, 682, 737-755.
115. Yergin, D. (2020). *The new map: Energy, climate, and the clash of nations*. Penguin Uk.
116. Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Summerhayes, C. P., Wolfe, A. P., Barnosky, A. D., Cearreta, A., ... y Williams, M. (2017). The Working Group on the Anthropocene: Summary of evidence and interim recommendations. *Anthropocene*, 19, 55-60.

117. Zhao, X., y Luo, D. (2017). Driving force of rising renewable energy in China: Environment, regulation and employment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 48-56.
118. Zheng, X., Lu, Y., Yuan, J., Baninla, Y., Zhang, S., Stenseth, N. C., ... y Chen, D. (2020). Drivers of change in China's energy-related CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(1), 29-36.
119. Zhou, N., Khanna, N., Feng, W., Ke, J., y Levine, M. (2018). Scenarios of energy efficiency and CO2 emissions reduction potential in the buildings sector in China to year 2050. *Nature Energy*, 3(11), 978-984.
120. Zepf, V. (2020). The dependency of renewable energy technologies on critical resources. In *The Material Basis of Energy Transitions* (pp. 49-70). Academic Press.
121. Zheng, S., Yang, J., y Yu, S. (2021). How renewable energy technological innovation promotes renewable power generation: evidence from China's provincial panel data. *Renewable Energy*, 177, 1394-1407.

**CAPÍTULO 4. EL PARADIGMA ELÉCTRICO EN MÉXICO: ANÁLISIS DE LOS
DETERMINANTES DE LA TRANSICIÓN SOCIOTÉCNICA Y SU DESEMPEÑO
BIOECONÓMICO**

Introducción

El objetivo de este capítulo es analizar el proceso de transición sociotécnica del SEM. En el primer apartado se realiza el análisis a partir del Modelo Multinivel Bioevolutivo con la finalidad de identificar los factores micro-meso-macro que han propiciado la transformación del sector y particularmente las fuentes renovables en la generación eléctrica nacional. Con estos elementos se puede identificar el tipo de transición actual del SEM con base en la taxonomía del capítulo 2. Debido a la historia y relevancia del SEM para la economía y sociedad nacional, se dividen el recorrido histórico en cuatro etapas: desde finales del siglo XIX a 1937; 1937-1992, 1992-2012 y 2013 hasta la actualidad.

La segunda parte del capítulo evalúa el desempeño bioeconómico de la transición sociotécnica del SEM. La finalidad es comprender el SEM más allá del aspecto técnico y ligar su actual estructura a factores económico, energéticos y sociales. Finalmente, se construye un indicador de evolución entrópica para mostrar la relación entre aspectos sociotécnicos, desgaste energético y producción del sector.

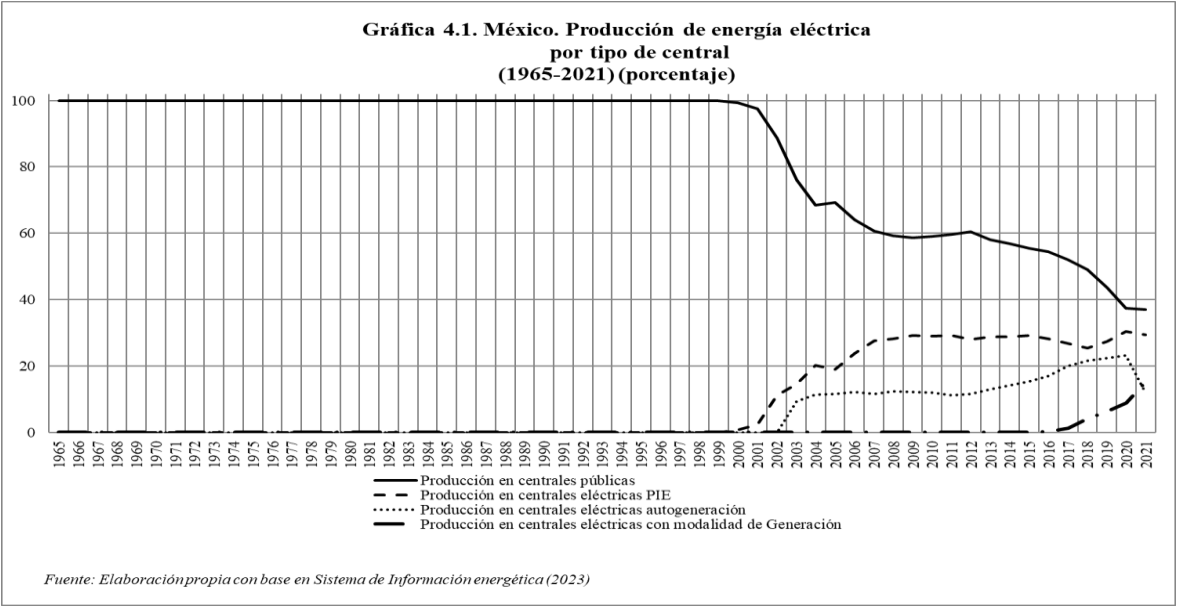
De esta forma, se puede estimar movimientos en la evolución del índice y su incidencia sobre las variables económicas presentadas: valor bruto de producción, consumo sectorial y precio de tarifas eléctricas. Sobre todo, el valor del índice puede tomarse como una medida de sustentabilidad ambiental fuerte del SEM. La evaluación conjunta ofrece herramientas que amplían el análisis bioeconómico sectorial.

4.1 Análisis de la transición sociotécnica del Sector Eléctrico de México a través del Modelo Multinivel Bioevolutivo

4.1.1 Importancia y contribución sectorial del SEM

La pandemia a causa del virus SARS-CoV-2 aceleró una trayectoria presupuestada hacia una economía y sociedad electrificada. Basta con observar nuestros entornos y percatarnos de los servicios que dependen de esta fuente energética. Asimismo, la posibilidad de construir una dinámica laboral, económica y familiar a la distancia gracias a dispositivos cuyo funcionamiento dependen del servicio eléctrico. Tan sólo proyecciones de la IEA (2022) revela que la electricidad representará el 60% de la matriz energética internacional para el año 2040.

Es tal la relevancia del sector que a nivel internacional existe interés por entender su dinámica y sobre todo construir las bases para el desempeño de un sector eléctrico eficiente, estable y sobre todo de menor impacto ambiental. Tal como se ha señalado en el capítulo 3, existen países con distintos comportamientos respecto a la consolidación de su sistema eléctrico hacia un esquema de sustentabilidad energética, por ello, se han integrado formas alternas de producir electricidad.

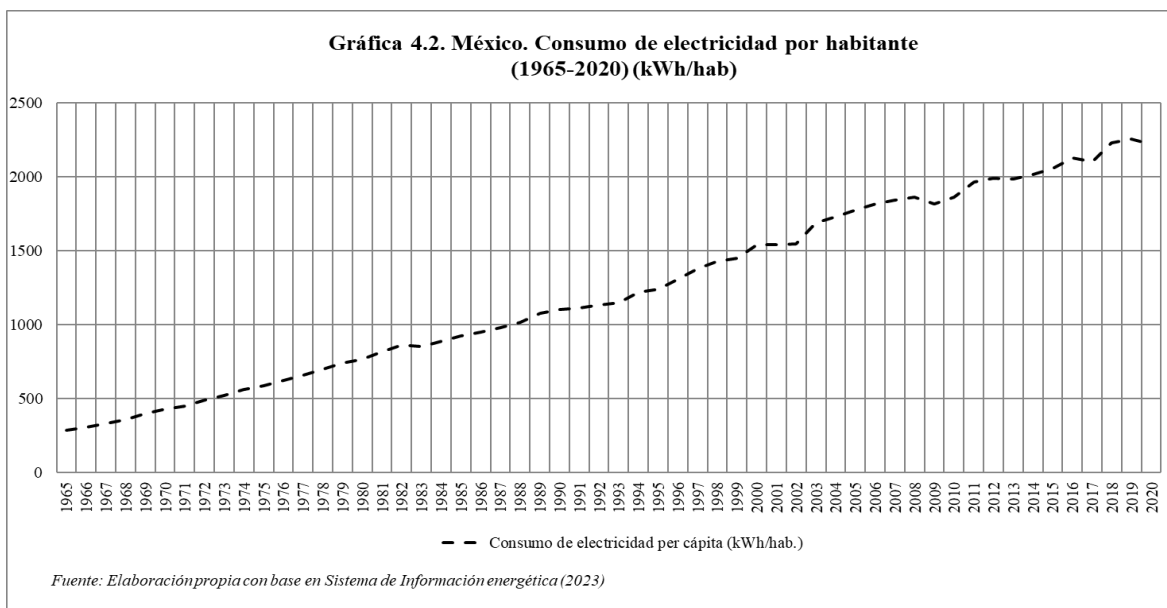


En el caso de México desde 1937 hasta finales del siglo XX, las centrales públicas conservaron el control pleno de la producción. Como más adelante en el capítulo se presentará, las diversas reformas que ha sufrido el sector establecieron las bases para el ingreso de la iniciativa privada en la generación. Como ilustra la gráfica 4.1, la participación privada y mixta bajo las figuras de Productores Independientes de Electricidad (PIE), Pequeños Productores de Autogeneración (PPA) y Modalidad de Generación (MG), generaron el año 2020 el 30.5%, 30.5% y el 8.8% de la generación eléctrica nacional respectivamente en demerito de la generación de centrales públicas (37.3%).

La importancia histórica del Sector Eléctrico de México (SEM) es un hecho incuestionable. La industrialización del país se debió en gran medida gracias al despliegue de la red eléctrica (Cárdenas, 2015). En la actualidad, su desempeño constituye el motor de la economía (Sánchez *et al.* 2004). El esfuerzo de proveer a la totalidad del territorio nacional de energía eléctrica es una meta casi culminada. La figura 4.1 muestra el porcentaje de población con acceso a electricidad cuyo promedio nacional de 99.12% para el año 2020, cuota superior respecto al 92.80% correspondiente al 1990. La Ciudad de México es la entidad con mayor porcentaje de servicio eléctrico en hogares (99.84%) mientras Chiapas es el último posicionado con el 97.70%.

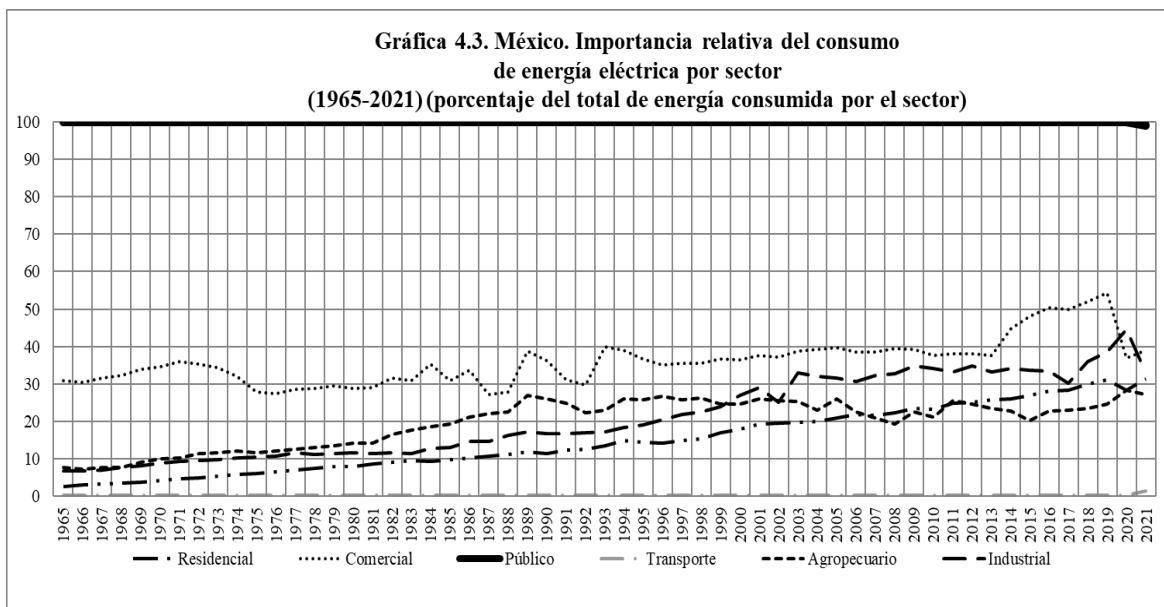


El crecimiento demográfico y la dinámica económica conlleva dos retos claves para el sector. El primero es el crecimiento constante del consumo por habitante. El actual estilo de desarrollo y crecimiento nacional se ha vinculado fuertemente a la dependencia energética. Por lo cual, México es el segundo país de América Latina que mayor uso energético realiza respecto al crecimiento del PIB tal sólo por debajo de Chile (Berinat y Chemes, 2020).



En gran medida, el incremento de la intensidad energética de la economía mexicana se caracteriza por un incremento constante del consumo eléctrico. El gráfico 4.2 indica que para el año 2000 cada habitante en promedio consumía 1539 kWh, mientras que antes de la pandemia, en 2019, el consumo pasó a 2256 kWh, siendo un incremento del 46.5%.

Ambas medidas de consumo, tanto la intensidad energética y el consumo de energía eléctrica, reflejan un fenómeno internacional asociado a la expansión del consumo exosomático. Este término refiere al incremento de bienes y servicios más allá del umbral necesario para la reproducción humana y social. A medida que aumenta la complejidad social, la expansión de la matriz energética permite la creación de bienes innecesarios.



Los incrementos en la demanda de electricidad no sólo se registran por la intensidad en el consumo de los hogares sino también por la estructura sectorial nacional. La gráfica 4.3 muestra la importancia relativa del consumo eléctrico por sector. Por su naturaleza, el sector público vinculado principalmente en actividades administrativas es preponderante en la demanda eléctrica con un 100%, es decir, el consumo energético total proviene de la electricidad. Respecto al sector comercial, en 2018 la electricidad representó el 58% del total de consumo energético. Este nivel descendió hasta el 36.9%, entre otras causas, posiblemente debido al cierre de la economía por el confinamiento sanitario.

De manera contraria, el sector industrial incrementó la importancia de la electricidad en su matriz de consumo constituyendo el 44.4 % en 2020. De manera paralela, en el sector residencial la electricidad representó el 28.5% del consumo energético total mientras que para el sector agropecuario representó una magnitud similar, el 28.4% para 2020.

4.1.2. Retos actuales y futuros del SEM en el contexto internacional

La electricidad es la fuente energética referente del mundo. La mayoría de servicios en los hogares y las industrias vinculan su funcionalidad al acceso eléctrico. A nivel internacional, la demanda eléctrica creció en 2.1% en 2022 respecto al año previo (Enerdata, 2024), sin

embargo, el predominio de las centrales carboeléctricas ha posicionado al sector dentro de los principales generadores de ECO₂ (IEA, 2024).

De esta manera, el crecimiento de la participación eléctrica en el mix energético mundial exige la reconversión de las prácticas productivas para disminuir las emisiones de gases invernadero. Por lo cual, la evolución de la infraestructura en el presente y hacia el futuro vuelve a la electricidad en un sector estratégico para la descarbonización de la economía.

Por otra parte, en respuesta a la caída de la actividad económica a causa del confinamiento por la COVID-19, varias regiones del mundo han promovido políticas de desarrollo productivo para salir del estancamiento. Este fenómeno está siendo considerado el retorno de la política industrial (Evenett *et al.* 2024) y ha sido refrendada por varios países a nivel global: en Estados Unidos con el *Inflation Reduction Act* (2022), la Unión Europea y el *New Green Deal* (2023), China con el programa *Made in China 2025* (2023), Brasil y la publicación del *Nova Indústria Brasil* (2024) son algunos casos de reindustrialización para la consolidación de estructuras productivas resistentes a fin de crear las condiciones suficientes para mitigar los efectos adversos como fue la pandemia.

El perfil de industrialización busca el desarrollo productivo local para incrementar la productividad, la competitividad, la generación de empleos y el incremento salarial, por consiguiente, reducir las brechas de ingreso y desigualdad. La revitalización de la estrategia industrial (Mazzucato, 2023) ha tomado el problema climático como una ventana de oportunidad para la creación de una estrategia de desarrollo particular. En efecto, el horizonte de política industrial que se debate actualmente integra la perspectiva ambiental y la innovación como guías para reducir las ECO₂ y vincular su trayectoria hacia los escenarios descritos por el IPCC para impedir el incremento de la temperatura planetaria más allá del umbral crítico 1.5 °C-2 °C respecto la temperatura preindustrial.

El cambio de enfoque de la política industrial sitúa al Estado como un actor relevante para la definición del plan, metas e instrumentos en la cual pueda participar la iniciativa

privada, sociedad civil, academia y gobierno. A diferencia de la convención tradicional sobre las funciones del Estado en la economía donde se opta por la omnipresencia gubernamental, en las nuevas reflexiones sobre política industrial, se busca delimitar al Estado como articulador de las estrategias de desarrollo, gestor de los bienes públicos, garante de la seguridad social, promotor del empleo y convocante

El centro de acción de la política económica hacia la disminución de ECO2 requiere ir más allá del Estado desarrollista y emprendedor. Es relevante la consolidación de una entidad estatal promotor del desarrollo sustentable⁵⁷ (Kastelli et al. 2023). Si bien la política energética, el desarrollo industrial y las políticas de desarrollo social tienen metas específicas, es posible encontrar puntos comunes que interceptan las tres. En específico, los planes de industrialización buscan impulsar la transición energética a través del desarrollo tecnológico y la innovación de nuevas tecnologías. Esto permite definir una serie de sectores estratégicos, impulsar la economía circular, reformar el sector educativo para el desarrollo de personal capacitado, la formación de capacidades públicas y fuerte financiamiento.

Dentro de los sectores estratégicos se encuentra la electricidad. El proceso tiene tres objetivos claros. El primero es la reducción de ECO2 a causa de los combustibles fósiles tradicionales que hace uso las tecnologías convencionales, el segundo es ofrecer servicios energéticos de calidad, bajo impacto ecológico y accesibles. Finalmente, el tercer argumento radica en el incremento en el nivel de generación eléctrica para hacer frente al incremento de demanda mundial a causa del acelerado proceso de electrificación de la economía.

México no está exento de la tendencia internacional. Si bien actualmente no existe un programa nacional de desarrollo productivo sostenible, más allá del decálogo de política industrial⁵⁸, el SEM se enfrenta a los compromisos en materia de emisiones a los cuales el

⁵⁷ Kastelli et al. (2023) denominan el “environmental state” a la situación donde el Estado orienta la transformación productiva hacia el cumplimiento de metas ambientales.

⁵⁸ Publicado en octubre del 2019, el decálogo de política industrial fue un esfuerzo de la Secretaría de Economía, a cargo en ese momento de Graciela Márquez, por establecer una hoja de ruta para el desarrollo productivo mexicano. Sin embargo, no se desarrolló una agenda concreta con los mecanismos, instrumentos, metas, objetivos y fechas de la propuesta, por lo cual, se cuestiona severamente su operatividad y alcance. Documento

país está suscrito, la evolución tecnológica de las plantas generadoras y la apertura del mercado a los productores privados. Además, desde el gobierno federal encabezado por Andrés Manuel López Obrador, se debate sobre la soberanía energética fundamentalmente en función de la centralización de la generación eléctrica que implica la consolidación de un nuevo esquema de actores ganadores y perdedores.

Entender las dimensiones de la transición energética en el sector eléctrico mexicano requiere un análisis de largo plazo para evaluar la configuración institucional, regulatoria, evolución de mercado, participantes, disponibilidad tecnológica, dimensión social, impactos ecológicos y todos aquellos aspectos que han contribuido a la evolución del sector y que juegan un papel crucial para el fomento, obstáculos o tensiones para la proliferación de las fuentes renovables de electricidad. Desde una perspectiva socioambiental y sistémica, el objetivo de los siguientes apartados es analizar la evolución histórica del SEM a través del MMB para distinguir los factores micro-meso-macro que han orientado el cambio del patrón tecnológico y comprender sus impactos.

4.1.3 Inicios de la industria nacional hasta la institucionalización de la electricidad: 1880-1937

Los orígenes de la industria eléctrica mexicana se remontan a finales del siglo XIX. Gracias al crecimiento y desarrollo de los sectores minero y textil, además del naciente servicio de alumbrado público, se gestó un impulso para la construcción de los primeros proyectos independientes generadores de energía eléctrica. Los ferrocarriles también fungieron un papel clave. En gran medida contribuyeron a la creación de un mercado interno dinámico que permitió obtener recursos fiscales y conjuntamente estimular otros sectores y regiones del país (Kuntz, 2007).

Sobre la primera empresa que se tenga registrada como iniciadora se tienen dos pistas. La primera que señala el Rodríguez Mata (1954), quien registra en 1903 la primera planta

disponible en <https://www.gob.mx/se/prensa/anuncia-el-gobierno-de-mexico-nueva-politica-industrial-221132>.

hidroeléctrica en Guanajuato. Sin embargo, Bacon y Besant-Jones (2001) narran una historia distinta. Señalan la existencia de 177 centrales eléctricas al interior del país, siendo la empresa textil Hayser en Guanajuato durante 1879 quien instaló la primera central termoeléctrica. Por otra parte, Rodríguez (2016) determina la presencia de 100 empresas durante 1887 a 1911 principalmente de capital nacional.

La naturaleza de estas empresas responde a demandas específicas de ciertas empresas e industrias sin contar todavía con un esquema independiente y formal de generación y transmisión. Los primeros proyectos de alumbrados en las ciudades y comunidades impulsaron la primera demanda social de energía⁵⁹.

La consolidación de la industria eléctrica se gestó durante el mandato de Porfirio Díaz. El proyecto económico nacional intentó vincular y desarrollar una serie de industrias a fin de generar servicios básicos y estratégicos. Conjuntamente, la ideología liberal del gobierno promovió fuertemente el papel de la iniciativa privada. A causa de esta visión gubernamental, se constituyeron los primeros marcos institucionales importantes para el desempeño de la industria incluida la eléctrica. Así, el Código de Comercio de 1889 y el Ministerio de Fomento, Colonización, Industria y Comercio⁶⁰ fundado en 1853 dirigieron el camino para el establecimiento de las empresas extranjeras.

Como resultado, en 1903 entró en operación la empresa canadiense The Mexican Light and Power Company, que fue la primera empresa independiente dedicada exclusivamente a la generación eléctrica. Al tratarse de una planta termoeléctrica, el impulso

⁵⁹ Es importante destacar el papel del alumbrado público como impulso a la estructura organizada del sector eléctrico. En el caso de Londres se estableció de alumbrado en 1880, mientras en Argentina fue en 1887 convirtiéndose en la primera ciudad latinoamericana en tener este servicio. Como se indica, México no estuvo alejado de esta tendencia.

⁶⁰ De acuerdo con Martínez y Moncada (2011) este organismo tenía una agenda de funciones extremadamente amplia. Era encargada de estadística, libertad de industria y de trabajo, agricultura, comercio, minería, privilegios exclusivos, mejoras materiales, carreteras, ferrocarriles, puentes y canales, telégrafos, faros, colonización, terrenos baldíos, monumentos públicos, exposiciones de productos agrícolas, industriales, mineros y fabriles, desagüe de México, trabajos públicos de utilidad y ornato que se hicieran a costa o con la protección del erario; consejería y obras de Palacio y edificios de gobierno, operaciones geográficas y astronómicas, viajes y exploraciones científicas, pesas y medidas.

de la turbina provenía del agua, para lo cual, fue necesario establecer concesiones durante un tiempo pactado sobre el uso del agua de los ríos. Esta medida fue un elemento institucional relevante para el desarrollo de la generación eléctrica. Siguiendo a Rodríguez Mata (1954) y Rodríguez (2016), el sistema de concesiones para la explotación del agua se volvió un instrumento clave para el funcionamiento de las plantas hidroeléctricas. Así, el sistema de concesiones pasó de 10 años como límite a 20 años gracias a un decreto de 1906, posteriormente se modificó el margen en un intervalo entre 20 y 99 años.

La empresa The Mexican Light and Power Company se convirtió en un ente preponderante. Durante la primera y segunda década del siglo XX compró varios de los proyectos eléctricos independientes, además de hacer uso de su capacidad técnica para iniciar exploraciones en distintos estados del país con el objetivo de evaluar la disponibilidad de ríos y cuencas. Estos estudios determinarían la capacidad de fuerza de los motores que potencian las hidroeléctricas. Entre las empresas adquiridas se encuentran Compañía de Luz y Fuerza de Pachuca, Compañía de Fuerza de Zitácuaro, Compañía de Luz y Fuerza de El Oro, Compañía de Fuerza del Suroeste de México, y la Compañía de Luz y Fuerza Eléctrica de Toluca.

Una de las razones que explican la expansión de dicha empresa fue el financiamiento externo. Se tiene registro de una serie de bonos que permitieron recaudar recursos de Bélgica, Francia y Canadá. Sin embargo, los efectos de la Revolución Mexicana ocasionaron una demora en los pagos por parte del gobierno reflejado en un problema de solvencia. El endeudamiento del servicio público de electricidad pareciera una herencia desde inicios del siglo XX.

Esta primera época se caracterizó por el dominio de tecnología hidroeléctrica y termoeléctrica movida por motores hidráulicos cuya fuente principal era el agua. Al respecto, De la Garza *et al.* (1994) señala poca diferencia tecnológica entre las plantas de electricidad. La única transformación radical representó el cambio de turbinas a pistones. En consecuencia, la fuerza de trabajo empleada carecía de una especialización particular y tuvo

un rezago importante respecto a las nuevas formas organizativas que conlleva la evolución de un sector (Laviada, *et al.* 1994).

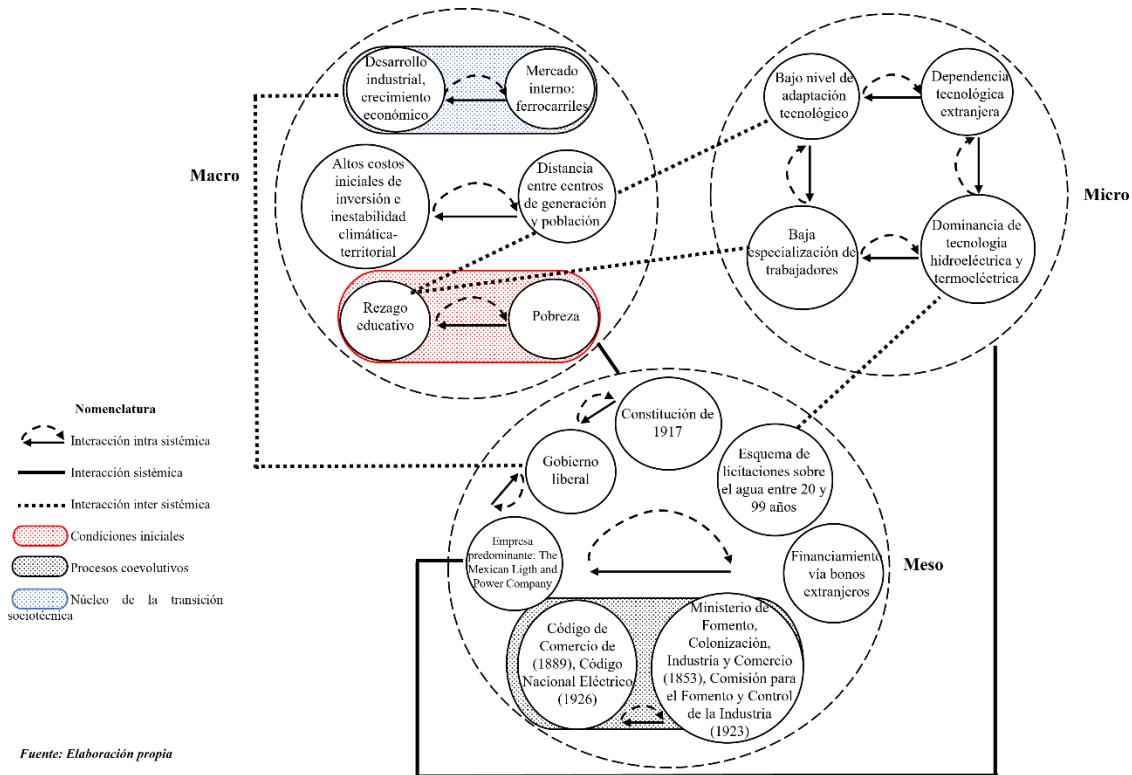
Con el transcurrir del tiempo, la creciente demanda eléctrica a causa de la urbanización, crecimiento económico y desarrollo industrial, en conjunto con la proclamación de la Constitución de 1917, establecieron las condiciones para la formalización de la industria eléctrica. Entre los principales instrumentos para el control de la industria eléctrica destaca la creación de la Comisión para el Fomento y Control de la Industria de Generación de Fuerza en 1923 y el Código Nacional Eléctrico en 1926. Ambos mecanismos evitarían ganancias extraordinarias, estructuras monopólicas y construyeron una estructura regulatoria del servicio público (Rodríguez, 2016).

A pesar de los esfuerzos por consolidar el sector, los indicadores de desarrollo de la energía eléctrica eran pobres. Siguiendo a Tannenbaum (1951) para 1936 tan sólo el 1.1% de los municipios en México contaban con el servicio en sus domicilios. Además, el sector se enfrentó a ciertas condicionantes. Por ejemplo, el desarrollo de la industria basado en hidroeléctricas y termoeléctricas estuvo expuesto por la irregularidad de las precipitaciones incrementando los costos de inversión y elevando la incertidumbre para el desarrollo de nuevas plantas de producción.

Asimismo, siguiendo al historiador estadounidense, los obstáculos adicionales fueron los altos costos de inversión inicial, amortización lenta, inestabilidad económica, política, la distancia entre la localización de plantas y las poblaciones. Frente a ello, se hizo necesario el surgimiento de un organismo como la Comisión Federal de Electricidad (CFE) dando paso a otro periodo característico del sector que se aborda en el siguiente punto.

Para concluir la reflexión sobre el inicio de la industria, se analiza la dinámica con base en el Modelo Multinivel Bioevolutivo los rasgos característicos con el propósito de identificar los elementos claves en la conformación del sector y los obstáculos que se enfrentó, además de mostrar de manera secuenciada y particular las retroalimentaciones más relevantes.

Figura 4.2. México. Análisis Multinivel Bioevolutivo del SEM hasta 1937



La figura 4.2 desagrega el análisis de la dinámica del SEM en su etapa inicial. A nivel meso, las condiciones clave para la difusión se trata de los organismos federales como el Código de Comercio y el Código Nacional Eléctrico conjunto a los Ministerios de Fomento Industrial. Todo esto gracias a la visión de gobierno y la instauración de una nueva Constitución. Esta dinámica fue resultado de una interacción inter sistemática que corresponde a un proceso coevolutivo clave que se trata del crecimiento económico, desarrollo industrial y el mercado interno gracias al ferrocarril, todos elementos del espacio macro.

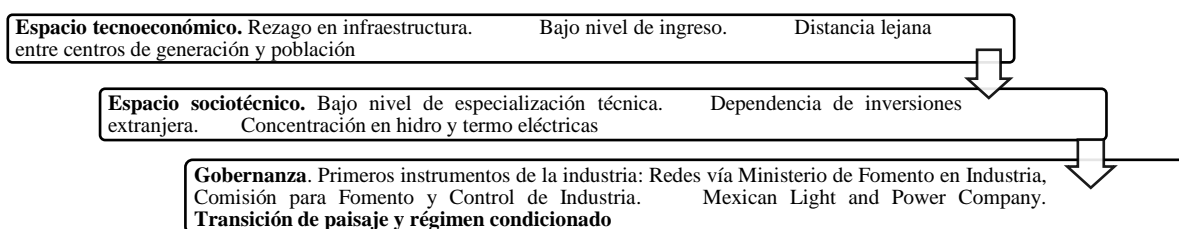
Correspondiente a este mismo nivel analítico, los obstáculos y limitaciones de la primera etapa del SEM se debieron a las condiciones territoriales y climáticas junto a la lejanía entre los centros de distribución y población. Paralelamente, una condición inicial profunda fue el bajo nivel de ingreso y educativo. Este último impactó en el espacio micro,

específicamente en la baja especialización técnica y por ende escasas capacidades de adaptación a nuevas tecnologías.

Además de las interrelaciones señaladas, un elemento clave es la importancia del espacio tecno económico, sociotécnico y el perfil de la gobernanza. Respecto al primer espacio, en el *espacio tecno económico* domina la falta de infraestructura de redes de transmisión, el nivel de pobreza para adquirir el servicio y el rezago educativo. *En el espacio sociotécnico*, existen límites para la adquisición de tecnología, la dependencia extranjera y la baja profesionalización de los pioneros del sistema eléctrico. De esta forma, las formas tecnológicas establecidas fueron la hidrotérmicas y termoeléctricas.

Finalmente, las características de la gobernanza se consolidaron por la creación de instituciones tales como el Ministerio de Fomento e Industrial, la Comisión para el Fomento y Control de la Industria, el esquema de licitaciones para la explotación de agua y el financiamiento extranjero permitieron la consolidación de un sector comendado por la Mexican Light and Power Company. Con estos elementos, se construyeron los cimientos de la industria nacional. En conclusión, la transición del sector en esta época se considera de paisaje y régimen condicionado, siguiendo la clasificación del capítulo 4. Si bien existe una organización del naciente mercado eléctrico concentrado en una empresa extranjera, las barreras en el espacio tecnoeconómico y sociotécnico limitaron el despliegue de la industria en todo el territorio nacional.

Figura 4.3. Dinámica del espacio tecnoeconómico, sociotécnico y características de la gobernanza. SEM hasta 1937



Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Segunda etapa: Institucionalización y desarrollo: 1937-1992

A pesar del turbio panorama político en el país derivado por la Revolución Mexicana y la Guerra Cristera, el desarrollo de la industria logró relativa estabilidad durante la segunda década del siglo XX. De acuerdo con Cárdenas (1994), entre 1924 y 1928 la industria minera tuvo un crecimiento del 8.8% anual gracias a la exportación de plata, cobre y zinc. Sin embargo, la crisis de 1929 golpeó severamente a la economía mundial y México resintió severamente los estragos.

En efecto, las exportaciones y las importaciones disminuyeron 65% y 68% respectivamente, el PIB redujo 17.6 puntos porcentuales en términos reales, la inversión cayó 35%, mientras la agricultura se redujo en 25%, la producción de materias primas se contrajo 45% y la participación de la plata en el valor de las exportaciones pasó del 18% previo de la crisis al 3.8% (De la Peña y Aguirre, 2006).

La caída en los ingresos de la economía en su conjunto provocó un incremento en las tarifas eléctricas de pequeños y medianos consumidores, generando un proceso de disputa entre las compañías eléctricas y la población receptora del servicio eléctrico. La creciente tensión obligó al gobierno de Abelardo Rodríguez a intervenir en la regulación del sector enviando una iniciativa para la creación de la CFE. Así, fue durante agosto de 1937 cuando fue aprobada su creación con el objetivo de “organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica basado en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro y con la finalidad de obtener, con un costo mínimo, el mayor rendimiento posible en beneficio de los intereses generales”

Para lograr la consolidación de la CFE como ente rector del desarrollo eléctrico en el país, se aprobó en 1939 la Ley de la Industria Eléctrica cuyos estatutos versaron sobre la regulación de concesiones para la generación y distribución de electricidad, determinación de tarifas y financiamiento de nuevos proyectos. Entre los principales instrumentos financieros destacó la Ley de Impuestos sobre Consumo de Energía Eléctrica que consistía

en el cobro del 10% sobre el importe de consumo con la finalidad de captar recursos para nuevos proyectos.

La reorganización del sector eléctrico se enfrentó a distintas situaciones. La heterogeneidad tecnológica de las empresas hizo difícil la consolidación de un sistema integrado de distribución. La Mexican Light and Power Company ofrecía una frecuencia de corriente a 50 ciclos por segundo mientras la Foreign Power Company a 60 ciclos (Díaz-Bautista, 2004). Esta dificultad técnica limitaba la integración de nuevas regiones del país por la diferencia entre tensiones resultando en la concentración del servicio en zonas urbanas e industriales. Para compensar el papel de las empresas privadas, la CFE comenzó a integrar una serie de filiales como la Compañía Eléctrica de Nayarit, Compañía Eléctrica de Chapala fundando así la Nueva Compañía Eléctrica de Chapala.

Los frutos de la nueva estructura eléctrica gracias al impuesto y partidas designadas desde el gobierno federal⁶¹ dieron sus frutos hasta mediados de 1940 y floreció durante 1950. Durante 1945 a 1959, la CFE y sus filiales pasaron de tener el 5% al 53% de capacidad instalada (Ortega, 2016). Simultáneamente comenzó una ola de proyectos eléctricos en Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Chiapas, Nayarit y Sonora, regiones donde las empresas privadas no había llegado privilegiando la electrificación rural.

A pesar del gran despliegue del sector, comenzó un relativo estancamiento. De acuerdo con Sunyer y Checa-Artasu (2015), a finales de 1950 los proyectos de generación hidroeléctrica, tecnología dominante, se enfrentaron a fuertes incrementos en los costos de las obras provocando dificultades para la captación de inversiones. Siguiendo a los autores, una de las razones para el fin de la era dorada de la producción hidroeléctrica fue el desconocimiento técnico sobre el potencial hidroeléctrico del país dando paso a la generación termoeléctrica con base en combustóleo⁶², fuente privilegiada por el sector público.

⁶¹ Además de estas dos fuentes de ingresos, los créditos privados permitieron incrementar el potencial eléctrico principalmente del Export and Import Bank y del International Bank for Reconstruction and Development.

⁶² En 1959, la CFE comenzó la instalación de la primera planta geotérmica en el país. A pesar de su desmantelamiento pocos años después se trató del antecedente.

Para incrementar la participación del sector público en la rectoría de la electricidad, en 1959 comienza un proceso de adquisición de las mayores compañías extranjeras operando en el país como la Mexican Light and Power Company, Compañía Impulsora, Compañía Mexicana de Luz y Fuerza Motriz. El proceso se ratifica con el anuncio de nacionalización del sector eléctrico al modificar el artículo 27 de la constitución donde “corresponde a la Nación generar, transformar, distribuir y abastecer la energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio eléctrico y aprovechar los bienes naturales que se requieran para dicho objetivo” (Ramos y Montenegro, 2012).

El objetivo principal de este cambio en la composición del sector fue ampliar las bases para la generación de electricidad a la luz del crecimiento poblacional, económico e industrial. Además, se buscó la integración de los 11 sistemas interconectados que trabajaban de manera aislada. Para ello, el Estado mexicano tomó las riendas a través de tres empresas: Compañía de Luz y Fuerza Motriz, Empresas Eléctricas-Nafinzas y la CFE.

Durante 1960 y 1980 se vivió una época gloriosa en el crecimiento de la capacidad instalada quintuplicándose respecto a la década anterior (Ovalle, 2007) a una tasa anual acumulada del 9.7% (Díaz-Bautista, 2004), siendo la CFE el principal actor con el 54% del total.

Para que pudiera darse una rápida expansión y fortalecimiento de la inversión fue urgente atender el problema técnico de dualidad bajo la cual operaba el sistema eléctrico. Como se apuntó líneas previas, la diversidad de operarios bajo 50 y 60 ciclos encareció las tarifas, se concentró la producción en las ciudades y complicó la distribución de los excedentes eléctricos. Es así, en 1971 se unificaron los sistemas a 60 ciclos para cualquier sistema de generación.

Esta misma década fue muy dinámica para la consolidación del sector. Durante diciembre de 1975 el gobierno decretó una nueva Ley Eléctrica donde la CFE tomó el control total de la generación, conducción, transformación, conducción y venta de electricidad. Esto

posible gracias a la compra y liquidación de filiales. El gobierno en turno de Echeverría además abrió la puerta hacia nuevos horizontes.

En efecto, como señala Carreón et al (2010), en 1974 se promovió la modificación al artículo 27 para otorgar al Estado mexicano el derecho para la explotación de energía nuclear para la producción de electricidad. Dicho avance legal se mezcló perfectamente con estudios realizados en 1966 entre la Comisión Nacional de Energía Nuclear y la CFE donde se determinó que la costa veracruzana de Laguna Verde era ideal para la instalación de una planta nucleoelectrica. Con ello se intentó disminuir parcialmente el dominio de hidroeléctricas y termoeléctricas.

En la misma sintonía, en 1975 se creó el Instituto de Investigaciones Eléctricas con el propósito de promover la investigación científica para incidir en la innovación del proceso en cualquier etapa del circuito eléctrico. Conjuntamente durante 1977 se creó el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) cuya finalidad es la gestión diaria del sistema eléctrico.

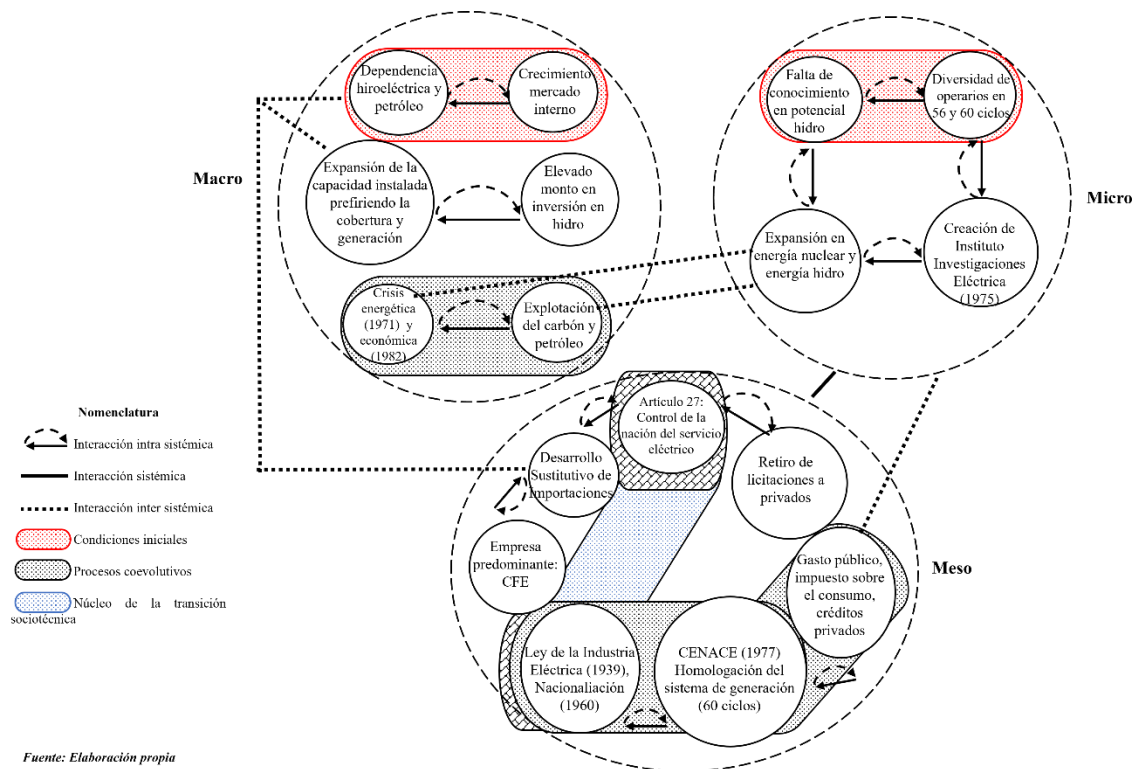
La virtuosa expansión del sistema eléctrico se enfrentó nuevamente a la inestabilidad interna y externa de la economía. El incremento del déficit público, altos niveles de la deuda y las pérdidas en particular de la CFE se conjugaron con el alza de los precios del petróleo para implementar acciones extraordinarias. Durante 1980 el gobierno decidió comenzar la instalación de plantas carboeléctricas en Coahuila y realizó los primeros estudios sobre el potencial geotérmico a fin de abatir la dependencia del combustóleo.

La crisis financiera de la entidad se reflejó en las acciones durante los 80's. Con la finalidad de incrementar la productividad, en 1985 se creó la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONUE) para promover el uso racional de los energéticos tanto en los sectores y las familias. En su génesis esta medida representaba una política alternativa al problema en la generación de electricidad (Díaz-Bautista, 2004).

Más adelante, en 1989 la CFE implementa un Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE) para fomentar el mínimo costo de producción y el máximo

aprovechamiento, además intentaba revertir la tendencia basada en combustóleo cuya eficiencia era baja debido a sus impurezas. Sin embargo, los intentos por disminuir la deuda de la CFE incluyendo una absorción del 15% de pasivos por parte del gobierno federal se conjugó con el entorno macroeconómico para modificar la visión sobre las empresas estatales.

Figura 4.4. México. Análisis Multinivel Bioevolutivo del SEM 1937-1992



El resultado es el fin de un ciclo desde la década de 1930 donde el Estado era el único garante de servicios estratégicos como la electricidad. A nivel global y en México la crisis económica de los 80's llevó a los tomadores de política a reducir el papel del Estado en la economía local (Carreón et al., 2005)⁶³

⁶³ Bacon y Besant-Jones (2002) identifican un conjunto de características particulares del agotamiento del modelo monopolístico verticalmente integrado del sistema energético internacional dominado desde los años 20's y 30's por el Estado. i) el pobre desempeño del sector con altos costos, inadecuada expansión en el acceso del servicio eléctrico para la población; b) la incapacidad del Estado para financiar nuevas inversiones; c) la

Desde el modelo multinivel bioevolutivo de este periodo, figura 4.4, el SEM tuvo como condiciones iniciales más relevantes la falta de conocimiento de otra forma de generación eléctrica y estaba concentrado en la hidroeléctrica, además de una expansión de la economía por la dinámica interna y una heterogeneidad técnica en los ciclos de distribución.

En las áreas señaladas, los procesos coevolutivos más importantes que propiciaron la innovación desde el espacio meso al nivel micro fueron la Ley de Energía Eléctrica (1939, 1975), el surgimiento de la CFE como principal actor del sector, el surgimiento de CENACE y sobre todo los mecanismos de financiamiento para las nuevas plantas generadoras. Como núcleo de la transición sociotécnica se ubica, desde una perspectiva bioevolutiva, la nacionalización de la industria y la reforma al artículo 27 institucional donde el Estado tiene la rectoría del SEM.

Finalmente, como procesos coevolutivos positivos en el espacio macro resalta la crisis energética de la década de los 70's que impulsó el surgimiento de fuentes alternativas como la nuclear, planteando así la necesidad de un organismo a nivel micro que invirtiera en innovación. De manera interesante, el pasar de la crisis energética, el abaratamiento de insumos fósiles y la disponibilidad del país tanto en carbón y petróleo influyeron negativamente en el impulso en nuevas alternativas de generación eléctrica. Adicionalmente, la crisis de la deuda de 1982 puso en evidencia la deficiencia de la forma de financiamiento reflejado en alto endeudamiento de la paraestatal.

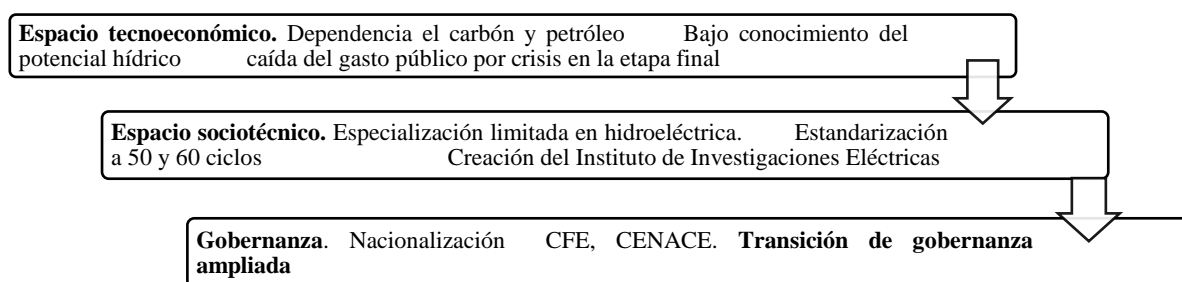
Adicionalmente, limitando los aspectos relevantes a nivel *tecnoeconómico* se consolidó un sector eléctrico basado en la explotación del petróleo y el carbón. Asimismo, la primera etapa de la industria nacional provocó altos montos de inversión promoviendo el desarrollo de las mismas tecnologías. Gracias a la expansión del mercado interno, el consumo exosomático

necesidad de remover subsidios en el sector para redireccionar esos recursos en otro tipo de gasto. Frente a esta narrativa, a finales de los años 80's y con la crisis económica como preámbulo se reestructuró severamente la participación del Estado en la economía y comenzó un proceso de apertura y desregulación de los sectores blindados a la competencia.

condujo las condiciones de crecimiento del servicio eléctrico. En cuanto al *espacio sociotécnico*, la falta del conocimiento del potencial nacional para el desarrollo de electricidad hidroeléctrica llevó a la expansión de la energía basada en carbón y petróleo -en gran medida por la disponibilidad extractiva del país-. Los elementos clave para el despegue técnico es la desregulación del mercado eléctrico para la operación de tecnologías 50 y 60 ciclos y la creación del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

La nacionalización y agotamiento del SEM a partir de la creación de la CFE, la reforma al artículo 27, la creación de la Ley de la Industria Eléctrica y la CENACE produjo una gobernanza liderada por las instituciones del Estado. El ideal sobre la expansión de la cobertura eléctrica superó las condiciones técnicas de financiamiento generando una estructura económicamente ineficiente a pesar del esquema de subsidios generados. Frente a la poca experiencia de las recientes instituciones de innovación, la transición durante el periodo puede caracterizarse por un camino de *gobernanza ampliada*. Dicho de otra forma, el Estado comanda el proceso de innovación, genera las condiciones suficientes para la maduración del SEM y su trayectoria de largo plazo.

Figura 4.5. Dinámica del espacio tecnoeconómico, sociotécnico y características de la gobernanza. SEM 1937-1992



Fuente: Elaboración propia

4.1.5. El origen de la transformación sociotécnica: 1992-2013

El cambio de ruta de gobierno federal respecto al papel del Estado en la economía y los problemas financieros del SEM condujo a una transformación severa en la configuración del sector. Durante el gobierno de Salinas de Gortari se implementó el Plan de Modernización Energética 1989-1994, cuyo marco legal alentó la participación de la iniciativa privada sin alterar la rectoría del Estado en el ofrecimiento de energía eléctrica.

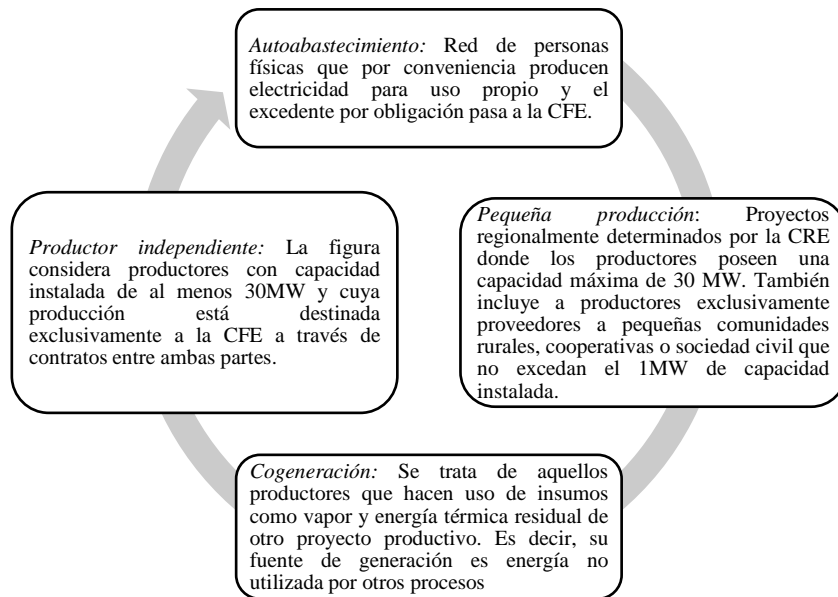
En este plan de acción la expansión del sector se vinculó al desarrollo de una nueva normativa y es así en 1992 se implementó la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica que abroga la ley de 1975. El marco normativo buscó promover la inversión privada en plantas generadoras a través de la diversificación del financiamiento con la obligatoriedad de vender la electricidad exclusivamente a la CFE.

Como primer punto, en 1994 ordenó la creación de Luz y Fuerza del Centro (LyFC) en sustitución de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro. De esta forma, tanto CFE y LyFC⁶⁴ estaría a cargo de la prestación del servicio público. Este mismo año, surge la Secretaría de Energía en sustitución de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal quien busca la coordinación de las distintas entidades a nivel sectorial. De manera síncrona se funda la Comisión Reguladora de Energía (CRE).

El nuevo panorama en el SEM se vuelve innovador al ampliar las modalidades de producción. En la figura 4.6 se presentan las modalidades de generación eléctrica donde puede intervenir la iniciativa privada. El nuevo esquema productivo permitía a la iniciativa privada importar y exportar electricidad, además podría ofrecer soporte cuando el sistema sufra alguna emergencia o eventualidad.

⁶⁴ Empresa posteriormente liquidada en 2009 en medio de una controversia. El gobierno federal argumentó que se trataba de un proceso de liquidación legalmente establecido en la Reforma. Además, se reprodujeron los mismos argumentos que han acompañado al desarrollo del SEM, es decir, la gran ineficiencia técnica, altos costos, gran pasivo y elevado gasto público invertido en su funcionamiento.

Figura 4.6. Formas de generación eléctrica establecidas en la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica 1992



Por tanto, el esquema eléctrico se transformaba en un esquema de cooperación entre la CFE-LyFC y el sector privado en las cuatro modalidades de generación. Aunque parecía atractivo, la inversión privada se enfrentó a un problema de abastecimiento de energía. En efecto, el esquema de cooperación estableció que Petróleos Mexicanos (PEMEX) sería el encargado de suministrar el gas natural bajo esquemas de contratos de largo plazo.

Sin embargo, señalan Jano-Ito y Crawford-Brown (2016), los empresarios acusaron a PEMEX de no garantizar un precio fijo del gas durante el tiempo en que ellos lograran liquidar los créditos para la construcción de las nuevas plantas, alrededor de 20 años. Frente a la incertidumbre por no contar con la seguridad de proveeduría de insumos, el número de inversiones presupuestadas con la nueva ley no fueron las deseables.

Para solucionar la falta de inversiones, pero sobre todo por la falta de recursos financieros del Estado mexicano para el desarrollo de inversiones debido a la crisis de 1994 se presentó un esquema de financiamiento denominado Proyecto de Inversión de

Infraestructura Productiva con Registro Diferido en el Gasto Público (PIDIREGAS) con la cual fue posible desarrollar proyectos de largo plazo tanto en el sector eléctrico y petrolero.

Una forma sencilla de entender esta forma de financiamiento, el empresario se encarga de construir el proyecto y al finalizar la CFE se encarga de iniciar el pago de la obra. Dicho monto se convierte en un pasivo para el gobierno (deuda soberana) y se refleja en el estado contable como una amortización. De acuerdo con Carreón (2010), durante los primeros 10 años de funcionamiento no hubo ningún tipo de incumplimiento y favoreció la consolidación de Productores Independientes de Energía (PIE) como figura alterna en la generación de electricidad. Esta visión fue corroborada por el Centro de Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados (2007) al considerarlo vital para la conformación de un mercado de inversionistas de largo plazo, mejorando la competitividad y reduciendo los costos.

Complementariamente, el gobierno recurrió a dos formas de financiamiento como son el esquema Construcción-Arrendamiento-Transferencia (CAT), Construcción-Operación-Transferencia (COT), y Construcción-Operación (CO). En la primera modalidad, el dueño de la planta renta a la CFE la planta durante 25 años haciéndose cargo del mantenimiento y posteriormente la paraestatal asume la propiedad. La segunda modalidad plantea el mismo esquema, pero el concesionario se responsabiliza totalmente del mantenimiento y finalmente la tercera modalidad no existe ninguna obligación por parte de del inversor a transferir la planta al finalizar el contrato.

La trayectoria del sector estuvo sujeta a un proyecto de transformación impulsada por Vicente Fox en 2002 sin recibir la aprobación del senado. En su camino, el SEM pasó por ligeras modificaciones. Entre las más destacables está una modificación a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica en 2001 donde se le permitió a los productores privados con capacidad máxima de 20 MW ofrecer sus excedentes a la red nacional sin necesidad de recurrir a los contratos establecidos. Este punto, narra Sánchez (2004), creó tensiones en la arena política por beneficiar de manera injustificada a la iniciativa privada fuera del marco legal original.

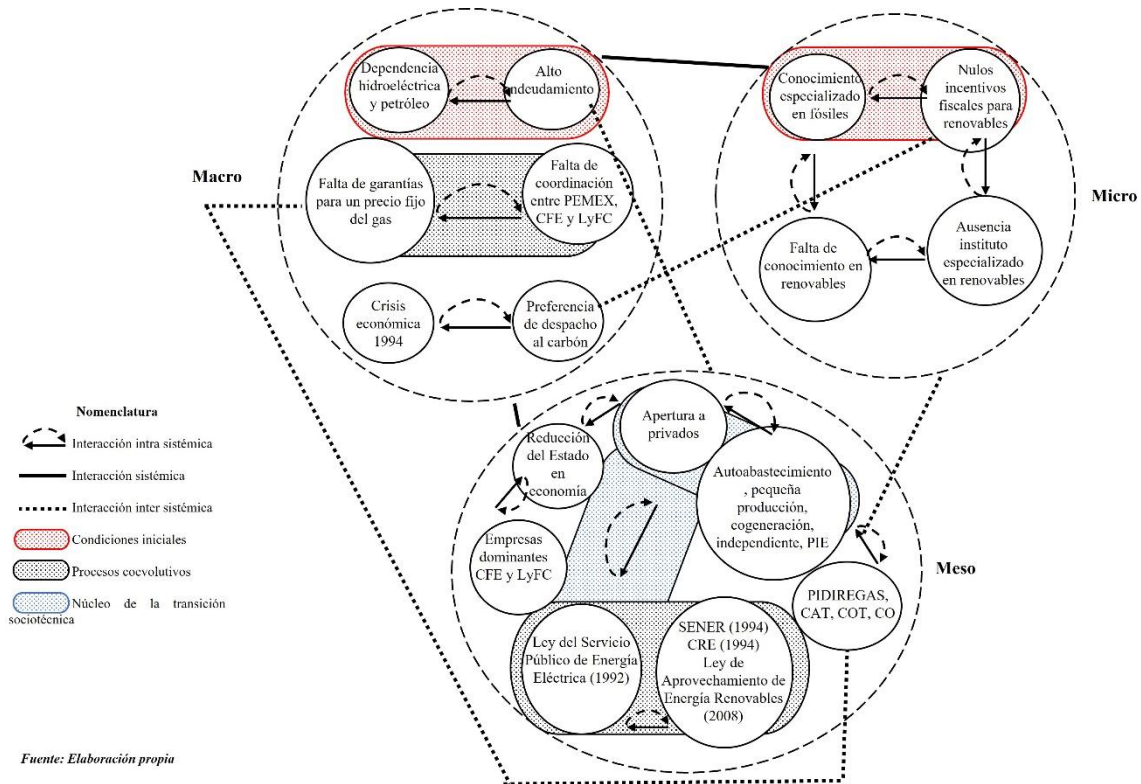
Más adelante, en 2008 se decretó la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética con la finalidad de diversificar las fuentes energéticas. Es el primer momento en el desarrollo del sector energético que se considera el aspecto ambiental en el proceso de expansión del SEM. El grupo de colaboración alemana GTZ (2006) señaló que en México habían existido esfuerzos por desarrollar energías renovables pero cuya perspectiva era de corto plazo. Entre las barreras señaladas estaba la falta de incentivos fiscales, el orden de despacho de electricidad en privilegio del carbón y la falta de conocimiento sobre el potencial mareomotriz, geotérmico, biomasa, agronómico, solar y eólico de todo el país.

La nueva ley en materia renovable se alineó a los compromisos ambientales contraídos por el país facultó a la SENER para establecer las metas de energías renovables en la generación de electricidad (al menos el 25 % de la generación eléctrica libre de emisiones de efecto invernadero para 2012), asegurar la participación de comunidades rurales, ejidales y comunales en la generación de electricidad con capacidad mayor a 2.5 MW e identificar el potencial geográfico para la construcción de proyectos que puedan interconectarse al SEM. La reglamentación busca integrar adecuadamente a los operarios de energía renovables en la red eléctrica nacional.

En cuanto al Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía se le asignó 3 mil millones de pesos del ejercicio fiscal del 2009 con la finalidad de incrementar la oferta de fuentes renovables, promover la investigación en materia renovable y mejorar la eficiencia energética.

Desde una perspectiva bioevolutiva multinivel de la figura 4.7, destaca como núcleo de la transición sociotécnica el espacio meso, particularmente la nueva Ley del Servicio Eléctrico y la apertura para participar la iniciativa privada. Un elemento clave para su desarrollo fue el esquema de financiamiento PIDIREGAS que movió una condición inicial del espacio macro que era el alto endeudamiento.

Figura 4.7. México. Análisis Multinivel Bioevolutivo del SEM 1992-2012

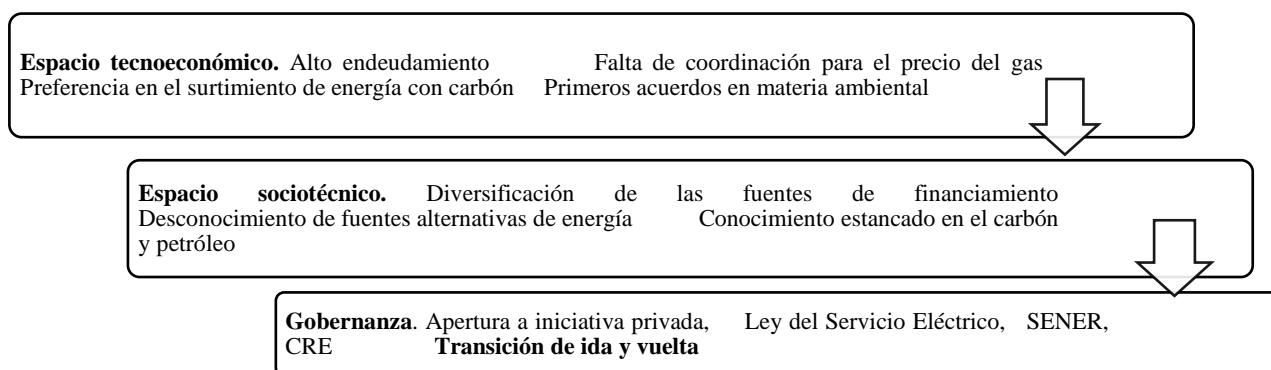


En términos de barreras a la difusión de energías renovables puede enfatizarse en problemas macro como la preferencia en el despacho de electricidad generada con carbón y petróleo. En la dimensión micro puede encontrarse la falta de una institución especializada en el desarrollo de energías renovables y la concentración técnica en hidro y carboeléctrica. Estos elementos fueron preámbulo sustancial para la siguiente Reforma al SEM de mayor rigurosidad.

Bajo la perspectiva de gobernanza, puede caracterizarse por impulsar *una transición de ida y vuelta* debido a que intentó consolidarse una estructura de convivencia entre la iniciativa privada y el sector público, particularmente, accediendo a nuevas figuras de producción gracias a la nueva Ley de la Industria Eléctrica. Si bien CFE y LyFC siguieron siendo empresas dominantes, la creación de la CRE y SENER potenciaron la incorporación de actores privados bajo las pautas permitidas. Adicionalmente, durante este periodo y ante

la exigencia de los primeros acuerdos internacionales en materia ambiental, se creó el Acuerdo para el Aprovechamiento de Energías Renovables.

Figura 4.8. Dinámica del espacio tecnoeconómico, sociotécnico y características de la gobernanza. SEM 1992-2013



Fuente: Elaboración propia

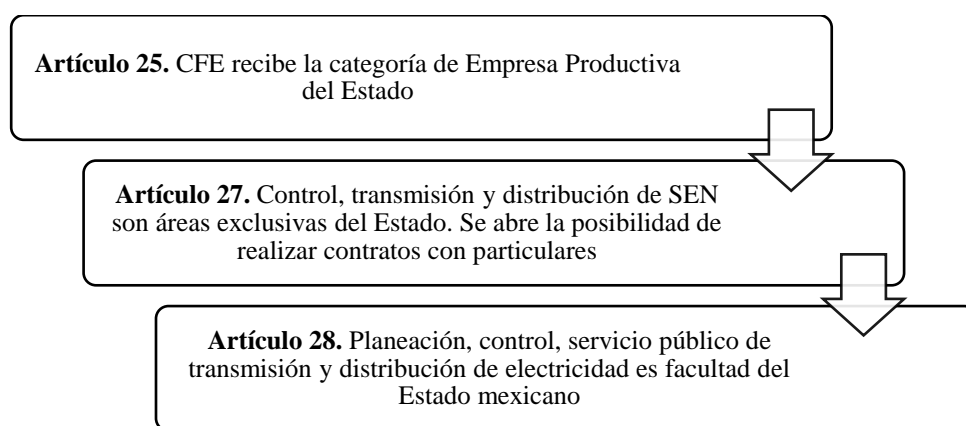
En el espacio tecnoeconómico, el grado de endeudamiento del SEM, la falta de coordinación entre CFE y PEMEX para la proveeduría del gas, la dependencia del carbón y la preferencia por el despacho del carbón limitó profundamente la incorporación de nuevas formas energéticas. En el caso del *espacio sociotécnico*, el único instituto encargado de la innovación del SEM se dejó gradualmente abandonado y no logró las competencias necesarias para el impulso y apoyo a fuentes alternas de generación eléctrica. De manera paralela, existe en el país una dependencia profunda a fuentes fósiles.

4.1.6 ¿Consolidación de las energías renovables en el SEM? Resultados y actualidad desde la Reforma del 2013

Uno de los problemas que no han sido posible resolver ha sido el gran nivel de endeudamiento. Los resultados financieros muestran un crónico endeudamiento. Para el año 2012 el déficit del SEM fue de 77 mil millones de dólares, mientras que la tarifa eléctrica son 25% más altas que en Estados Unidos a pesar de los subsidios (SENER, 2012).

La discursiva alrededor de gran endeudamiento, la ineficiencia técnica y la baja diversificación de las energías para la producción eléctrica llevó al gobierno a modificar nuevamente los pilares de la industria eléctrica. En 2012 la Reforma Energética formó parte de un conjunto de políticas dirigidas a modernizar la estructura industrial y en el caso del sector eléctrico, se plantea la modernización y desarrollo de las plantas generadoras. Para ello, la diversificación de la matriz energética es crucial pues el precio de la electricidad depende principalmente del precio del combustible (SENER, 2012).

Figura 4.9. Principales cambios constitucionales



Fuente: Elaboración propia con base en SENER (2012)

En este contexto de cambio institucional a tres artículos de la Constitución, la Reforma Energética especifica los detalles de la arquitectura del SEN dentro de la Legislación Secundaria. Al convertirse la CFE una empresa productiva del Estado, se estableció un entorno de competencia entre la iniciativa privada y estatal. La generación y la comercialización están abiertas a la iniciativa privada vía concesiones. Entre los puntos más destacables se encuentra la descentralización del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), organismo previamente integrado a la CFE, como el encargado del control operativo, es decir, el actor responsable de la red de transmisión, redes de distribución y el Mercado Mayorista. Asimismo, la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) se encargará de gestionar las licitaciones de gas natural y petróleo.

El mercado mayorista constituye espacio donde los participantes pueden comprar y vender energía eléctrica y potencia⁶⁵. Se busca que las transacciones se determinen por los costos variables y aquel método más económico será el primero en despachar electricidad en la red nacional.

En contra parte, el mercado minorista constituye un módulo del mercado mayorista donde los participantes del mercado con ubicación geográfica definida presentan ofertas y la CENACE se encarga de recibir las propuestas (de venta o compra de electricidad), define el horizonte de horario para cada día de operación, revisa los precios ofrecidos respecto a los precios de referencia⁶⁶ que proyecta el organismo, valida los parámetros técnicos de referencia de cada central eléctrica con relación a su tecnología y finalmente, en caso de ser favorable el procedimiento, se realiza la corrida de asignación en el mercado de tiempo real con base en el pronóstico de demanda más reciente.

Bajo el compromiso de impulsar la generación e incorporación de las energías renovables⁶⁷, la CENACE estableció las reglas de operación de un mercado de Certificados de Energías Limpias, módulo operativo del Mercado Mayorista. Estos títulos se otorgan por una cantidad determinada de energía limpia generada. Posteriormente, en el mercado spot los titulares podrán ofertar sus certificados al precio que decidan durante el periodo de tiempo establecido⁶⁸. El precio de venta es tal que el precio menor del total de ofertas de venta sea igual al precio mayor de ofertas de compra. Por consiguiente, los actores obligados a comprar los certificados impulsaran a la estructura productora de energía limpia.

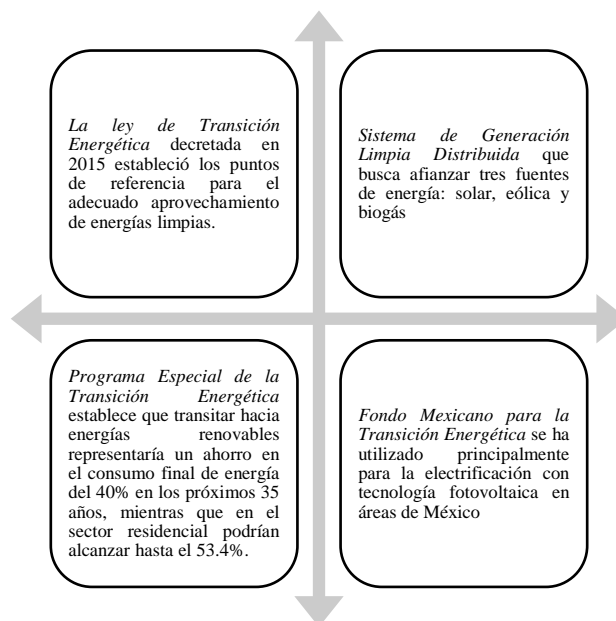
⁶⁵ Potencia se refiere a convenios donde los productores acuerdan con CFE la venta de cierta cantidad de energía para que pueda ser suministrada a la red eléctrica en situaciones consideradas excepcionales.

⁶⁶ De acuerdo con el Manual de Mercado de Energía de Corto Plazo que constituye el Transitorio Tercero de la Ley de la Industria Eléctrica publicada en 2015, los precios de referencia son precios nodales, es decir, precios medios ponderados por zona de carga. El precio se calcula con la suma de los productos de los precios marginales por los valores de distribución de carga de cada nodo (zona de carga).

⁶⁷ Para el año 2013, de acuerdo con datos del Balance Nacional de Energía (SENER), la producción de energía renovable (geotérmica, solar, eólica, hidroenergía y biomasa) apenas representó el 7% respecto a la energía primaria generada, mientras el petróleo representó el 64.3% y el gas natural el 22.7%.

⁶⁸ Las bases del mercado de Certificados de Energía Limpia abren la posibilidad de intercambiar a partir de Contratos de Cobertura Eléctrica de manera independiente a partir de un registro de ambas partes ante la CENACE.

Figura 4.10. Principales organismos y acuerdos para la transición energética



Fuente: Elaboración propia

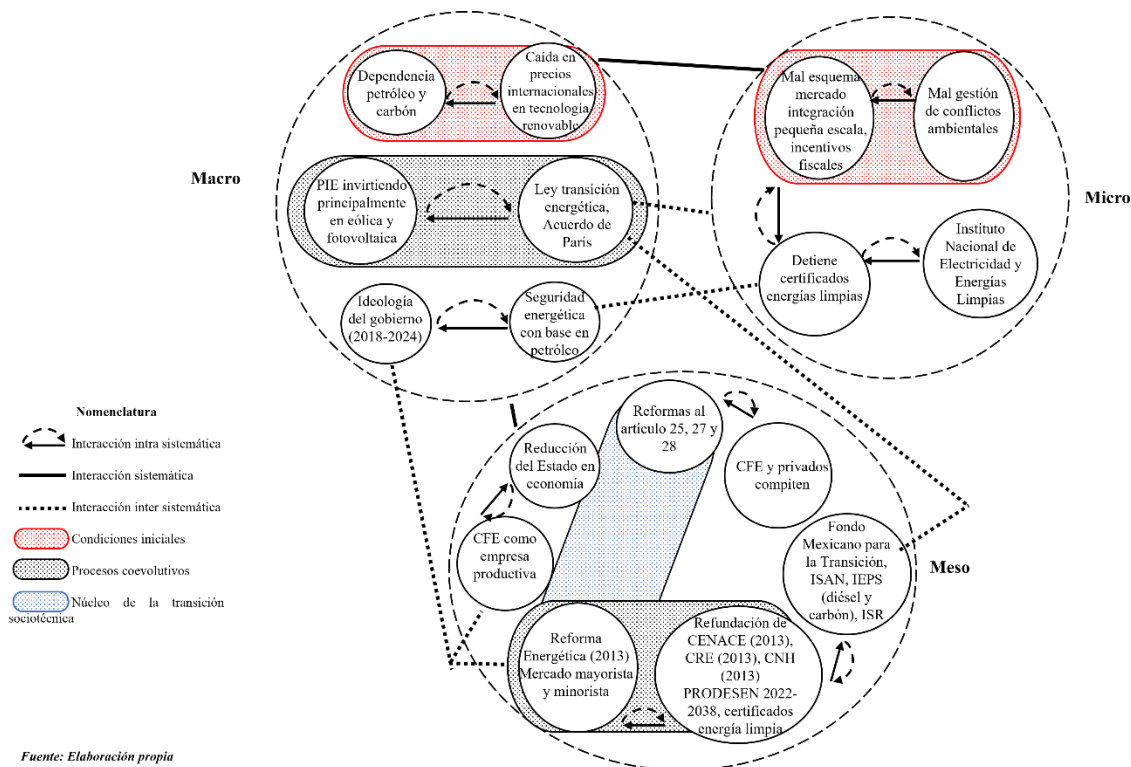
El establecimiento de los mecanismos de competencia, como puede analizarse, va acompañado de una fuerte estrategia para integrar las fuentes renovables. Junto al marco normativo de la industria eléctrica, México asumió una serie de compromisos a nivel internacional relacionados a la reducción de emisiones de efecto invernadero. La figura 4.10 destaca la estrategia para el impulso de la transición energética.

Entre los más destacables está el Programa Especial de la Transición energética y la Ley de Transición⁶⁹, de manera conjunta establecen metas fijas para el desarrollo de energías limpias, particularmente solar, eólica y biogás. Adicionalmente, el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2022-2036 coordina el retiro de centrales eléctricas con base en desempeño técnico y energético a fin de reducir gradualmente la

⁶⁹ De acuerdo con el Centro de Investigación Pública y Presupuestaria (CIEP, 2022), las acciones implementadas para impulsar la transición energética descansan financieramente sobre una proporción del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios (IEPS) al diesel, IEPS al carbón, Impuesto Sobre Automóviles Nuevos (ISAN) e Impuesto sobre la Renta (ISR)

intensidad energética basada en combustibles fósiles. Este acuerdo es resultado de la coordinación a nivel de régimen, particularmente SENER, CENACE, CRE y CFE.

Figura 4.11. México. Análisis Multinivel Bioevolutivo del SEM 2013



Siguiendo con el modelo bioevolutivo presentado en la figura 4.11, una de las principales barreras a la difusión de las energías fósiles recae principalmente sobre el nivel micro. En la actualidad existen pocos incentivos fiscales y tarifas de conexión competitivas, además la estructura de mercado no es clara respecto a la participación de pequeñas cooperativas y organizaciones productores, particularmente por la imposibilidad de vender ellos mismos su producción. En adición, el despliegue de energías renovables ha generado una serie de conflictos cuyos mecanismos tendrán que solventar problemáticas en ciertas regiones del país donde comunidades son gestoras del territorio y a su vez son potenciales para el desarrollo de eólicas y fotovoltaicas. Este punto se señalará más adelante.

Con el actual gobierno turno se ha encontrado barreras a la operación y difusión de renovables, bajo una idea de intentar recuperar la gestoría plena del SEM, se ha tomado la decisión de detener las subastas de energía limpia y en su lugar se opta por recurrir nuevamente a plantas que funcionan con carbón y petróleo. A pesar de existir las condiciones a nivel macro, a nivel micro existen procesos coevolutivos que realmente son obstáculos a la difusión y exige replantear el camino deseable para la transición sociotécnica.

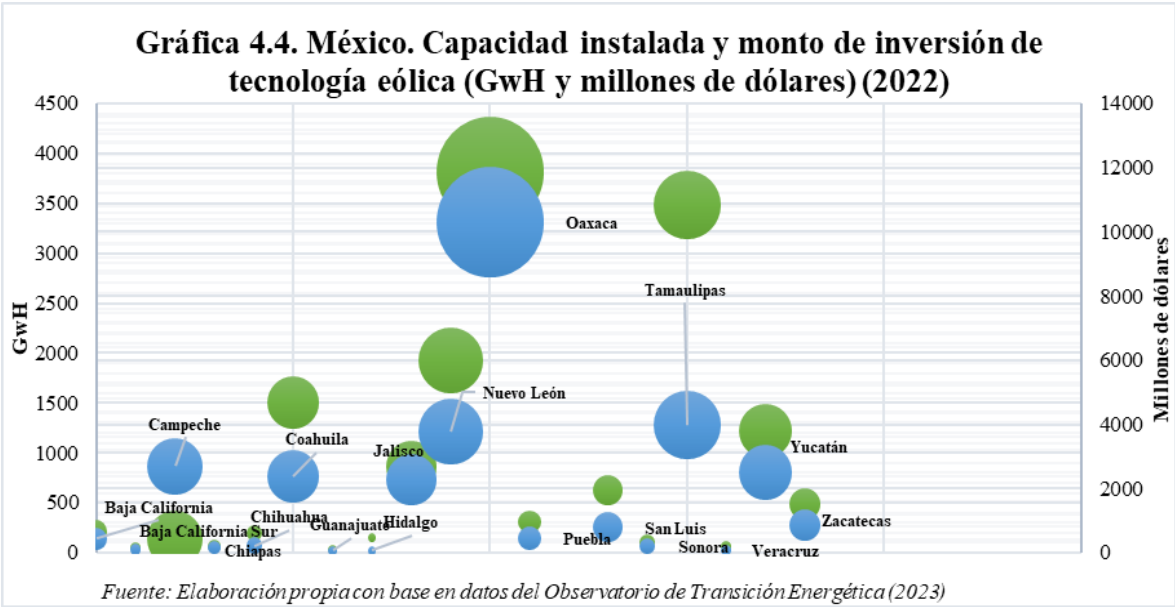
Hasta este punto se han expuesto los principales elementos de transformación del SEM a lo largo de su conformación considerando, desde la perspectiva multinivel, los principales procesos bioevolutivos que han impulsado u obstaculizado su dinámica. Sin embargo, desde esta perspectiva no es posible evaluar el desempeño energético de la actual configuración eléctrica. Por lo tanto, en la siguiente parte se analiza desde una perspectiva bioeconómica el desempeño económico, técnico y energético.

Con estos elementos iniciales, se tendrán los elementos para conocer si realmente es posible consolidar un camino energéticamente sostenible para el sector bajo las condiciones actuales desde una perspectiva entrópica. Es decir, evaluar el desempeño del sector desde esta perspectiva permitirá conocer los determinantes sobre el incremento/disminución de entropía en la generación de electricidad y su influencia sobre el valor de producción, tarifas eléctricas y dinámica sectorial. En este capítulo se presentará de manera preliminar el índice de generación entrópica y en el siguiente capítulo se utilizará dentro del Modelo de Simulaciones para conocer su incidencia en las variables descritas, entre otros factores.

4.1.6.1 Despliegue de energías renovables

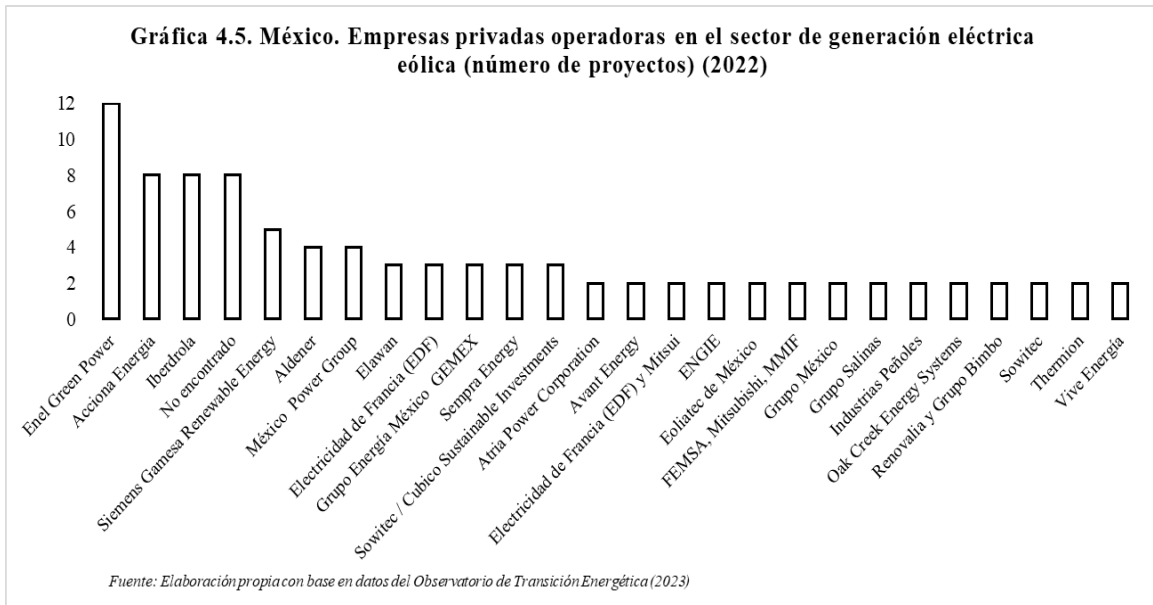
Gracias a la consolidación de la agenda en energías renovables comenzó una ola de inversiones en dos rubros particularmente: eólica y fotovoltaica. En el caso de la primera, hasta el año 2022 existen 127 plantas de generación cuya capacidad instalada es 15,259 GwH y representa 31,342.71 millones de dólares. La gráfica 4.4 muestra la distribución territorial de los proyectos eólicos. En el caso de Oaxaca es la entidad con mayor número (36), seguido de Tamaulipas (21), Nuevo León (13) y Yucatán (11). Tanto la capacidad instalada y el

monto de inversión corresponden en magnitudes similares y representa la jerarquía de los estados receptores.

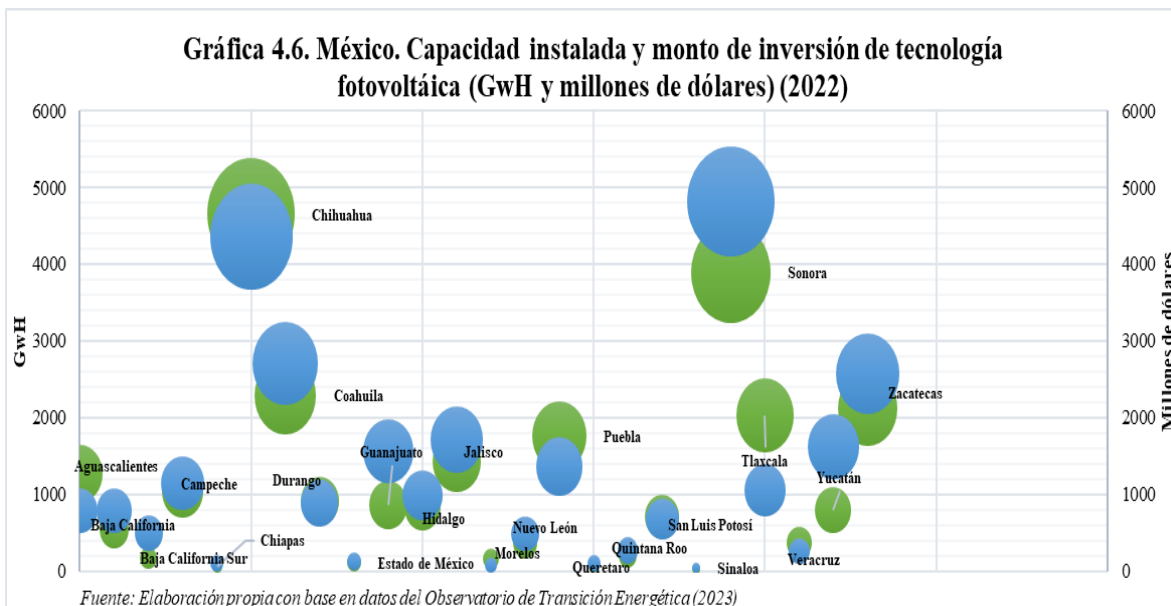


Realizando un análisis por empresas, la gráfica 4.5 muestra las inversiones eólicas están dominadas por empresas italianas, españolas, seguido de empresas francesas, estadounidense, japonesas y mexicanas⁷⁰. Es notorio el interés de la iniciativa extranjera en el desarrollo e instalación en el sector eólico aprovechando el potencial territorial de los estados líderes.

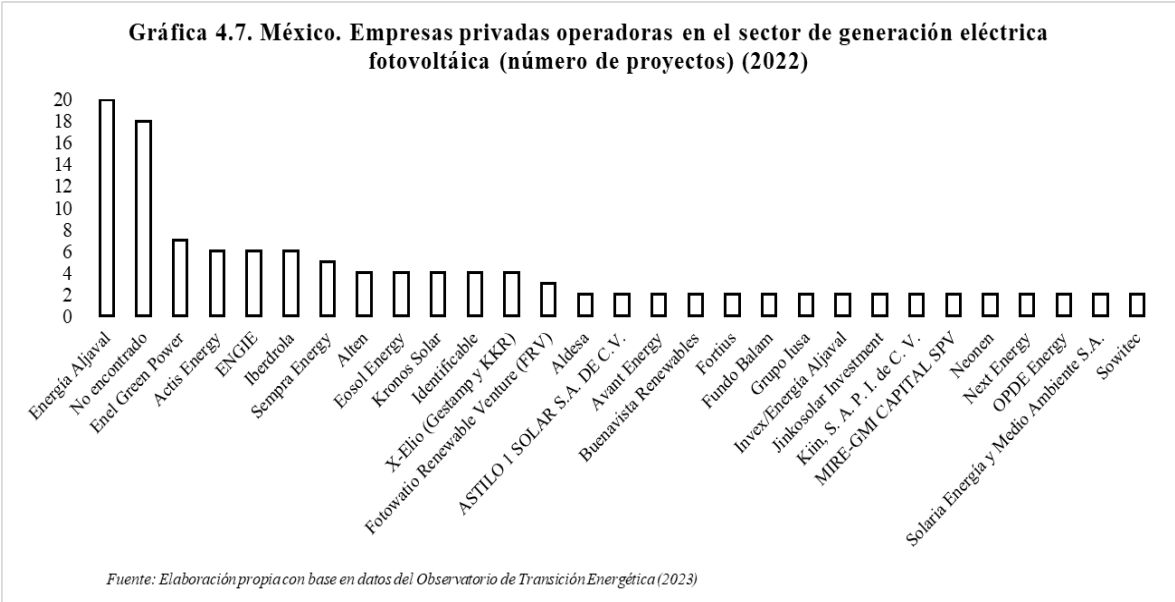
⁷⁰ El gráfico muestra las empresas con 2 hasta 12 proyectos activos. Para mejorar la claridad del gráfico, se omitieron aquellas que cuentan con sólo un proyecto. Ellas son: Acciona Energía / CEMEX; Actis (Zuma Energía) / ComexHidro ; Aldesa; Alesco S.A de C.V.; Audax Renewable (Fersa); CEMEX; Central Eólica México; CHUNCA DEL ISTMO, S.A. DE C.V.; ComexHidro / Next Energy; Compañía Eólica El Palmar, S. A. de C. V.; Compañía Eólica de Reynosa, S. A. de C. V.; desarrollo renovable de México S.A DE C.V.; Desarrollos Eléctricos de México, S.A. de C.V. (DEMSA); ECOWIND, S.A. de C.V.; EDP Renovables e Industrias Peñoles; Elecnor; Energía Sonora PPE, S. C.; Energía Veleta S de R.L. de C.V. Eoliatic de México / BAS Corporation; Eólica Buenos Aires. S. de R.L. de C.V.; Eólica El Sarro S.A. de C.V.; Fuerza Píñuco S.A. de C.V.; Fuerza y Energía Limpia de México, S. de R. L. de C. V.; Gamesa y Santander Generadores Eólicos de México (Geomex); Gobierno de Baja California; Grupo AC; Grupo Galectra; Iberia Group; Mse Eolicse Wind Limited; Naturgy; Oak; Creek; Energy Systems / GBM Infraestructura; Parque Eólico San Julián; Sempra Energy / Actis; Soriana, GEMEX y grupo ECOS; Vientos de Coahuila, S. A. de C. V.



Respecto a la energía fotovoltaica existe un interés grande a causa de la geografía nacional. Tan sólo hasta 2022 existen 2128 proyectos en funcionamiento cuya inversión fue de 2578.1 millones de dólares. Asimismo, el gran receptor de proyecto han sido Chihuahua (43), Sonora (31), Coahuila (18), Guanajuato (15) y Zacatecas (12). La distribución territorial puede verse en la gráfica 4.6



Es interesante analizar la composición a nivel de firma pues sigue la tendencia de las empresas del sector eólico. En efecto, de acuerdo con la gráfica 4.7 las firmas españolas, francesas e italianas lideran el número de proyectos actuales. La más destacable es Energía Aljaval (España) y Enel Green (Italia) y Actis Energy (Francia).



4.1.6.2. Generación distribuida

Una novedad en la restructuración del SEM a raíz Reforma Energética del 2013 y la modificación a la LIE, fue la incorporación de una modalidad de generación eléctrica de pequeña escala con el objetivo de impulsar el desarrollo de energía renovable. La generación distribuida hace referencia a pequeños sistemas eléctricos que se encuentran cerca de los centros de consumo. En cuanto a los criterios técnicos, se caracterizan por: i) capacidad de generación por debajo de 0.5 GW, ii) no se encuentran de forma constante conectados a la

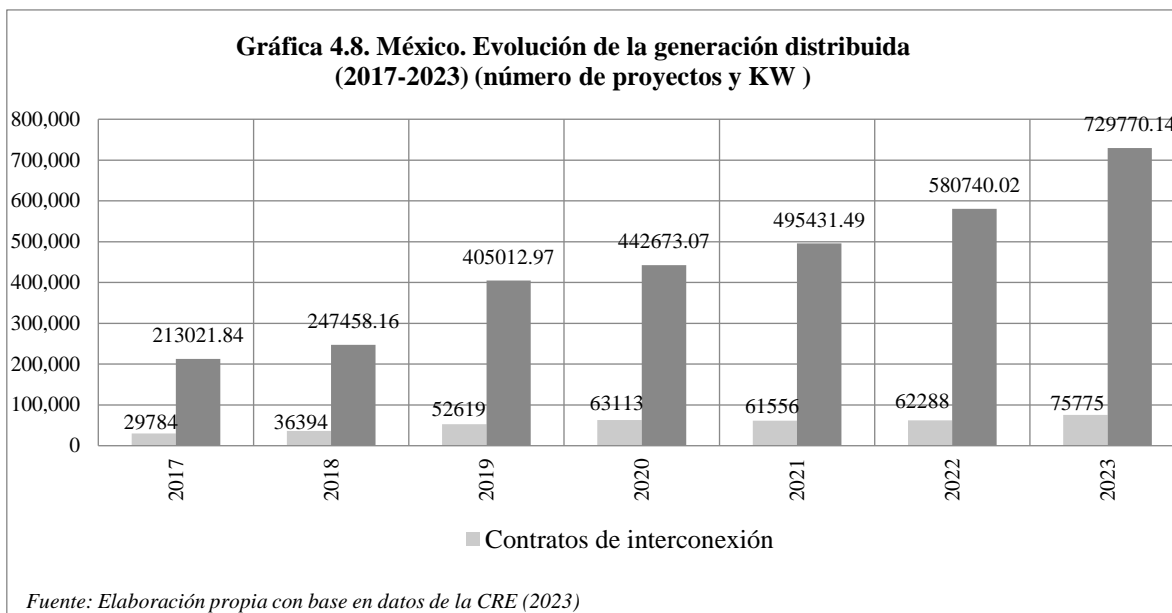
red nacional, iii) no requieren permiso para generar electricidad y iv) se clasifican por el nivel de tensión a la red a la que se conectan⁷¹.

En México sus reglas de operación están vinculadas al capítulo VII de la LIE mientras que las personas interesadas en su desarrollo e instalación cuentan con un Manual de Interconexión de Centrales de Generación Distribuida cuyo contenido describe los pasos y condiciones técnicas para recibir el reconocimiento de CENACE.

Si bien su aparición en la escena energética se dio en 2017, es interesante el gran despliegue que ha tenido en términos absolutos. De acuerdo a los datos publicados por la CRE (2024), existen tres modalidades de conexión a la red eléctrica para este grupo de usuario, siendo la medición neta⁷² de energía la preponderante con el 98.32% (equivalente a 375, 147 productores bajo esta forma operativa). En cuanto a la tecnología empleada predomina las plantas solares (99.93% del total de proyectos). Aunque existen algunos proyectos de biogas, biomasa, cogeneración, combustóleo, eólica, hidroeléctrica y motogeneración son poco representativos a nivel nacional.

⁷¹ Baja tensión si la red a la que se conectan los productores es de 1Kv y media tensión si el nivel de tensión es mayor a 1 kV y menos a 35 kV.

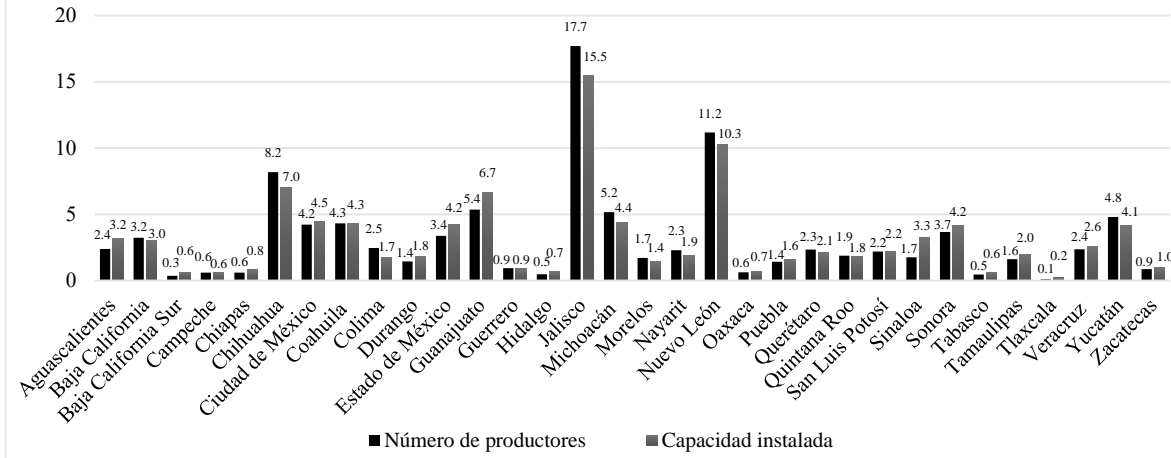
⁷² La CRE establece tres modalidades de conexión a la red para los productores bajo la denominación de generación distribuida. La medición neta (comúnmente conocido en la literatura técnica como *net metering*) se refiere al proceso donde el sistema eléctrico utiliza la red como una fuente de almacenamiento durante las horas de generación. En la facturación neta (*net billing*), el productor vende los excedentes de electricidad eléctrica y recibe una reducción en su propio recibo eléctrico que le permite compensar su facturación asociada al consumo durante las horas de producción nula. Finalmente, la venta neta se trata de un esquema de venta exclusivamente. Las últimas dos modalidades reciben el pago de la electricidad de acuerdo al precio marginal del nodo-P en donde están instalados. Estas dos últimas modalidades representan el 1.54% (5893 productores) y 0.13 % (417 productores) respectivamente de la generación descentralizada en México hasta 2023.



La gráfica 4.8 muestra la evolución de los productores bajo esta modalidad de producción eléctrica y la capacidad de generación. Ambos rubros muestran una tendencia sostenida y favorable desde 2017 hasta 2023. La tasa de crecimiento promedio anual es del 16.84% y 22.78% respectivamente. La capacidad de generación acumulada hasta el año 2023 es 3,114, 107.68 KW, es decir, 3.11 GW respaldada por 381, 529 sistemas de producción eléctrica de este tipo.

La generación distribuida tiene presencia en todo el país, sin embargo, son tres estados que concentran la mayor proporción de productores y capacidad de generación. De acuerdo con la gráfica 4.9, Jalisco posee el 17.7 % de los productores y el 15.5% de la capacidad de generación distribuida del país, seguido de Nuevo León (11.2% y 10.3) y Chihuahua (8.2 % y 7%) respectivamente. Por otra parte, las entidades con la participación más baja con menos del 1% en ambos estadísticos son Tlaxcala, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Hidalgo, Tabasco y Zacatecas.

Gráfica 4.9 México. Participación estatal en la generación distribuida (Acumulado 2017-2023) (Porcentaje)



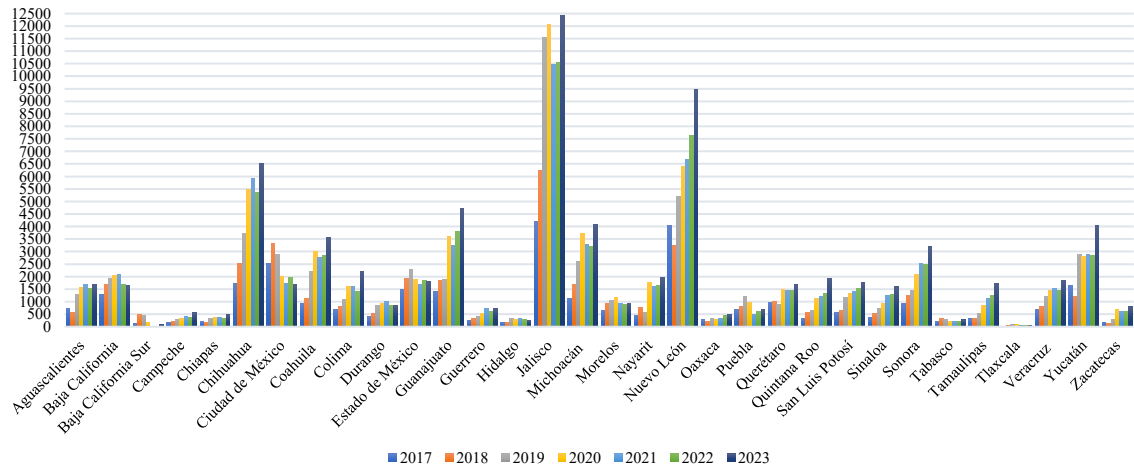
Fuente: Elaboración propia con base en datos de la CRE (2023)

Analizando las gráficas 4.10 y 4.11, la tendencia de la generación distribuida y el nivel de capacidad instalada siguen la misma tendencia. La mayor tasa de crecimiento en ambos rubros se dio en 2019 con un 44.6% y 63.7% respectivamente. Por otro lado, el impacto de la pandemia causó en 2021 una disminución en 2.5% en el nivel de nuevos productores.

Respecto al desempeño del último año, es decir 2023, Jalisco y Nuevo León conservan el liderazgo en materia de productores con el 16.4% y 16.4% respectivamente. Contrariamente, Tlaxcala es la entidad con menor desempeño pues su crecimiento apenas alcanza el 0.09%.

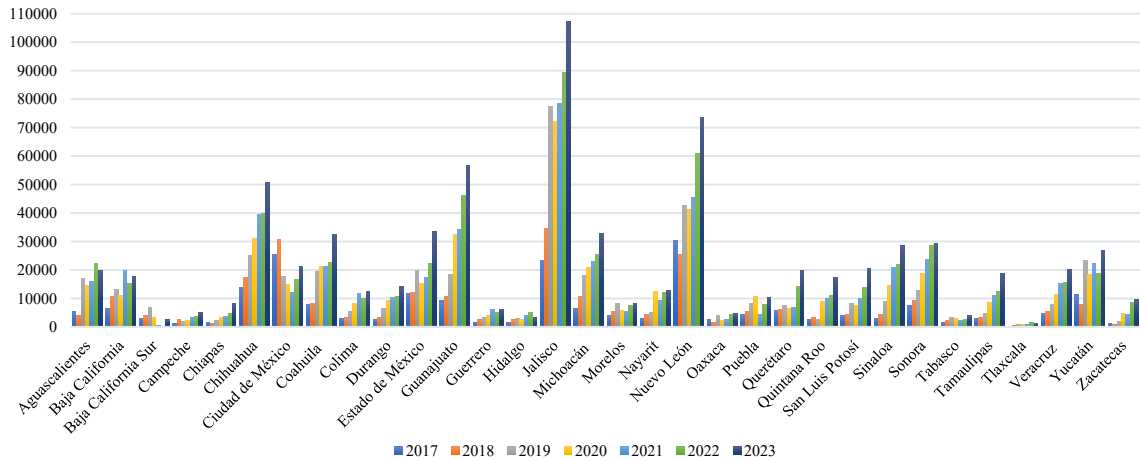
El liderazgo de Jalisco puede explicarse por dos factores. En primero el potencial solar de la región. El segundo, el más importante, es la creación de la Agencia de Energía del Estado de Jalisco. La creación de un organismo dedicado a la planificación energética local permite respaldar a nivel estatal la meta federal de incrementar las energías renovables. En el plan institucional del organismo establece el programa de fomento a la generación distribuida con la finalidad de generar electricidad a bajos costos para la economía en su conjunto.

Gráfica 4.10 México. Generación distribuida por estado (2017-2023) (número de contratos anuales)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de la CRE (2023)

Gráfica 4.11 México. Capacidad instalada modalidad generación descentralizada (2017-2023) (kW)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de la CRE (2023)

4.1.6.3 Conflictos de la transición

Desde una perspectiva socioambiental, es relevante considerar el proceso de transición energética como un proceso que conlleva tensiones y conflictos (Berntinat y Chemes, 2020; Tornel, 2020). El desarrollo de proyectos vinculados a las energías renovables está fuertemente vinculado a la perturbación de territorios principalmente rurales.

Bajo esta consideración, la LIE en el capítulo VIII establece los criterios de negociación entre las comunidades y dueños propietarios de tierras y los productores interesados en instalar proyectos eléctricos. De acuerdo con los artículos que integran este capítulo, la generación, transmisión y distribución de electricidad es una actividad estratégica, por lo cual, el uso del espacio destinado a este fin es preponderante respecto a cualquier otra actividad.

Las comunidades y propietarios tienen derecho a un proceso de negociación (artículo 73), bajo el respaldo de los acuerdos de protección a las comunidades indígenas (artículo 74) y asesoría legal (artículo 75). Asimismo, los interesados deben expedir un estudio de todos los beneficios y pérdidas del proyecto, mientras que los avalúos de la tierra están a cargo del Instituto de Administración y Avalúos de Bienes Nacionales.

Si bien es un avance que dentro de la ley se contemplen mecanismos de contención para evitar abusos de los productores dentro de las tierras, desafortunadamente existen controversias. El vínculo entre energías renovables y territorio es relevante. Las zonas con alto potencial eólica y solar en su gran mayoría son territorios rurales.

El crecimiento de las energías renovables ha llevado al desarrollo de mapas interactivos para dar cuenta de las regiones en el planeta con potenciales energéticos y al mismo tiempo situar los conflictos por la disputa del territorio y las nuevas fuentes energéticas (Ávila, *et al.* 2022).

Para el análisis de los conflictos asociados al desarrollo de proyectos eléctricos son dos. El primero es la revisión de estudios en la bibliografía especializada. El cuadro 4.1

muestra los hallazgos de ciertos artículos cuyo énfasis son los generadores de electricidad solar y eólica en México. Un punto común es la coincidencia territorial pues hacen referencia al sur y sureste del país, particularmente Oaxaca y Yucatán, zonas consideradas de alto nivel potencial energético.

A pesar de los mecanismos que se establecen en la LIE para garantizar un adecuado proceso de negociación, la evidencia recopilada muestra falta de claridad en los contratos, información confusa en los documentos otorgados por las empresas, bajos precios por la renta de las tierras y falta de integración de los propietarios de la tierra al esquema de ganancia.

Cuadro 4.1. Algunas evidencias de conflictos ambientales (eólico y solar) en el SEM

Autores	Hallazgos
Martinez y Gomez (2017)	Juchitán, Oaxaca. Principal destino de las inversiones eólicas. Reporta 17, 687 Ha destinadas a este sector. Gran proyecto "Corredor eólico del Istmo de Tehuantepec). Auge comienza desde el año 2000. Gabino Cué (2010-2016) aprueba 23 parques eólicos gracia a colusión con FEMSA. Autores muestran los bajos costos de compra de la tierra (1200 pesos por HA si tiene posesión de la tierra, 600 pesos si no lo tiene. Esquema de rentas de tierra únicamente les transfiere el 1% de ganancias. Mentiras acerca del proyecto y beneficios. Complejo Eólico Oaxaca I, II y III apenas ocuparon 298 empleados y durante 20 años apenas empleará entre 40 y 50 trabajadores por año. Resistencia civil detiene el proyecto "Mareña Renovables" entre 2011-2013 después de gran represión.
Howey, Boyer y Barrera (2015)	Acerca del proyecto "Mareña Renovables" tuvo como centro la falla de percepción de transparencia en todo momento, manipulación por parte del gobierno respecto a los contratos de explotación y derechos del suelo, corrupción de comisarios ejidales, apoyo volcado hacia empresarios del sector, acaparamiento de tierras a precios muy bajos y revendidas después a las empresas, convocatorias nada claras
Mejia-Montero <i>et al.</i> (2020)	Para 2019 existían 24 parques eólicos en el Istmo en un área de aproximadamente 25.000 hectáreas. Reportan baja claridad en la información y engaños a los ejidatarios. Falta de orientación para la formalización de los derechos de propiedad.
El Mekaoui (2018)	Yucatán ciudad atractiva para modelo eólico y solar. Las dos primeras grandes subastas recibió el 16% de las licitaciones. Diagnósticos se realizaron desde el aspecto técnico y económico, pero no social y ambiental. La población tiene miedo de que suceda lo mismo que en Oaxaca. Se demandaron en estas rondas de inversión cerca de 8700 HA. Sociedad se queja de la falta de transferencia de conocimientos y poca claridad en proceso legal
López <i>et al.</i> (2019)	Parques eólicos desarrollados para abastecer parques industriales, desarrollos turísticos o exportar electricidad. Comunidad se queja de que no se les ofreció electricidad gratuita. Proyecto Elecnor llegó a la ciudad de Kimbalá en busca de 76.5 HA (equivalente a 570 ejidatarios). El procedimiento se realizó de un día para otro, captura de los comisarios ejidales, ausencia de acompañamiento institucional, bajo pago por renta de las tierras (800 pesos cada dos meses). Comunidad defiende tierra para sus generaciones futuras.
<i>Fuente: Elaboración propia</i>	

La segunda fuente de información es el Atlas de Justicia Ambientales (AJA). Se trata de un proyecto a cargo principalmente del economista Joan Martínez-Alier. El AJA es una recopilación de datos que permite rastrear los conflictos ambientales desde una perspectiva de justicia ambiental (Martínez-Alier, *et al.* 2016).

De acuerdo con información del Atlas, México tiene 210 casos de conflictos registrados hasta el mes de agosto del 2023. Los conflictos asociados al sector eléctrico son 31. Las plantas generadoras de electricidad a partir de la fuerza motriz del agua, hidroeléctricas, lideran la lista con 12 casos reportados seguido de las plantas eólicas (11), fotovoltaicas (4), termoeléctrica (2), carboeléctrica (1) y nuclear (1). Un rasgo común de los conflictos es su sesgo contra las poblaciones de origen rural al ser receptores de la mayoría de los casos (25), mientras el resto corresponden a poblaciones semiurbanas.

Los casos reportados muestran dos perfiles claros de conflictos asociados con los actores protagonistas en la transición desde una perspectiva vertical como se impulsa desde el gobierno federal. El sector público a través de la CFE y la coordinación de SENER ha creado alianzas con el sector privado para impulsar las formas convencionales de generación eléctrica, es decir, carboeléctrica, termoeléctrica e hidroeléctrica. Los principales problemas son la presión contra las poblaciones para aceptar los términos de los contratos, uso indiscriminado del agua disponible en ríos y asesinato de líderes comunitarios.

En el caso del sector privado, las iniciativas para crear nichos potenciales de energía limpia han provocado conflictos por la instalación de proyectos eólicos y fotovoltaicos. La exigencia técnica por grandes cantidades de tierra ha provocado múltiples despojos, engaños, fraudes y presiones para que las comunidades acepten los términos de negociación en condiciones desfavorables. El proceso de apropiación de la naturaleza ha perturbado el entorno cultural de las comunidades.

Como se apunta, tanto el sector público y el privado han causado perturbaciones a causa del desarrollo del sector eléctrico. Sin embargo, el incremento acelerado en los últimos años de las inversiones en tecnologías renovables, principalmente eólica y fotovoltaica, ha provocado condiciones hostiles con los propietarios de las tierras.

Es ventajoso contar con un marco legal en la LIE que proteja las condiciones de negociación. No obstante, se requiere una vigilancia fuerte desde el espacio institucional para garantizar el cumplimiento de leyes mínimas para la conciliación de intereses entre

productores y dueños de la tierra. En la medida que sigan presentándose situaciones adversas, el incremento de las energías renovables en lugar de lograr el desarrollo regional puede causar el efecto contrario.

En efecto, la debilidad institucional para la aplicación de la ley en materia de uso de territorio puede incrementar las brechas existentes entre el norte y el sur del país. Paradójicamente, una estrategia de desarrollo para el sur basado en su potencial energético puede convertirse en un freno y acrecentador de las desigualdades. Así, quedan las preguntas sobre la falta de mecanismo para el buen funcionamiento de la normativa y si la generación distribuida podría reducir estas problemáticas mientras representa una oportunidad para el fomento de energía renovable.

4.1 Una reflexión general sobre la transición sociotécnica del SEM de largo plazo

El análisis resultado de la sección previa permite la construcción de una taxonomía general que permite comparar los diferentes periodos y evaluar el proceso de innovación del SEM como un elemento en coevolución determinado por la dinámica del resto de relaciones. Con base en ello, es posible denominar cada periodo por un tipo de transición particular que refleja los rasgos del análisis MMB. El cuadro 4.2 desagregada del cambio sectorial de la industria eléctrica.

Cuadro 4.2 Taxonomía de la transición en México. Periodos seleccionados

Nivel	Características	1880-1937	1937-1992	1992-2013	2013
Meso	<i>Fuentes de financiamiento</i>	Bonos extranjeros	Ley de Impuestos sobre Consumo de Energía Eléctrica, créditos privados y Banco Mundial	Proyecto de Inversión de Infraestructura Productiva con Registro Diferido en el Gasto Público (PIDIREGAS), Construcción-Arrendamiento-Transferencia (CAT), Construcción-Operación-Transferencia (COT), y Construcción-Operación (CO)	Impuesto Especial sobre Producción y Servicios (IEPS) al diésel, IEPS al carbón, Impuesto Sobre Automóviles Nuevos (ISAN) e Impuesto sobre la Renta (ISR)
	<i>Empresas dominantes</i>	The Mexican Light and Power Company	Comisión Federal de Electricidad, Compañía de Luz y Fuerza Motriz, Empresas Eléctricas-Nafinsa.	Comisión Federal de Electricidad, Luz y Fuerza del Centro	CFE, Enel Green Power, Energía Aljaba, Iberdrola
	<i>Estructura de mercado</i>	Privado con participación regulatoria del Estado	Monopolio estatal	Apertura a la iniciativa privada: autoabastecimiento, productor independiente, cogeneración, pequeña producción	Profundización de la competencia privada. CFE se convierte en empresa productiva
	<i>Principales reformas constitucionales</i>	Constitución de 1917	Reforma al artículo 27 que garantiza rectoría del sector público	Anulación de la propuesta de reforma al artículo 27 en el año 2002	Modificaciones al artículo 25, 27 y 28 de la Constitución
	<i>Incentivo fiscal</i>	Libre importación de tecnología	Falta de incentivos fiscales	No hubo incentivos fiscales para el desarrollo de renovables	No hubo incentivos fiscales para el desarrollo de renovables

	<i>Tarifas</i>	No existen tarifas de conexión para el impulso de inversiones	No existen tarifas de conexión para el impulso de inversiones	No existen tarifas de conexión para el impulso de inversiones	No existen tarifas de conexión para el impulso de inversiones
	<i>Acuerdos</i>	Código de Comercio (1889), Código Nacional Eléctrico (1926) y Comisión para el Fomento y Control de la Industria (1923)	Ley de la Industria Eléctrica (1939) y (1975)	Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (1992)	Reforma Energética (2013)
	<i>Organismos e instituciones regulatorias</i>	Inexistente	Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal	Comisión Reguladora de Energía (CRE)	Autonomía de la CENACE y la CRE. Creación de Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH)
	<i>Impulso institucional para energías renovable</i>	Inexistente	Comisión Nacional de Energía Nuclear (1974), Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONUE) (1985), Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE) (1989)	Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables (2008); Financiamiento de la Transición Energética (2008)	Programa Especial de la Transición Energética, La ley de Transición Energética, Sistema de Generación Limpia Distribuida, Fondo Mexicano para la Transición Energética, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2022-2036
Nivel	Características	1880-1937	1937-1992	1992-2013	2013
Macro	<i>Dependencia energética</i>	Basada en el desarrollo de hidroeléctricas	Hidroeléctrica, combustóleo, carbón y petróleo	Especialización en fuentes fósiles	Especialización en fuentes fósiles. Comienza la difusión del conocimiento en energías renovables principalmente en empresas privadas
	<i>Percepción social</i>	Intervención mínima del Estado para regular la actividad privada y públicas	Al final del periodo existe un interés por modificar la estructura del mercado para que de paso a la iniciativa privada y liberalización	Durante la última década del siglo XX existe una idea de ineficiencia por las épocas lideradas por el sector público, aunado al elevado nivel de endeudamiento. En cambio, durante la primera década del naciente siglo los acuerdos internacionales en materia ambiental inciden sobre el inicio de la transformación energética	Idea de ineficiencia de la estructura de mercado liderada por las entidades paraestatales reflejado en un intenso endeudamiento.
	<i>Contexto macroeconómico</i>	Inicio del desarrollo de la industria; conexión de regiones vía ferrocarriles	Impulso del desarrollo industrial desde la posguerra y posteriormente durante el proceso sustitutivo de importaciones	Primera crisis financiera del mundo ocurre en México. Dificulta la captación de inversiones. Crisis del 2008 profundiza el rol de la inversión extranjera	Estancamiento del crecimiento económico y productividad del país desde los años de 1990. Alto endeudamiento del SEM
	<i>Nivel educativo</i>	Bajo	Mejoras en los niveles educativos de la población y trabajadores	Mejoras en los niveles educativos de la población y trabajadores	Nivel educativo medio-bajo (9 años en promedio, 2022).
	<i>Barrera operativa</i>	Altos costos de la inversión, grandes distancias entre la generación y distribución	Caída de la inversión pública durante periodos de crisis (posguerra), caída de ingresos (crisis de los energéticos, 1973 y crisis económica de 1986)	Falta de coordinación entre Petróleo Mexicanos (PEMEX) y los actores privados para la proveeduría de gas	Límite al desarrollo de proyectos renovables por la revocación de permisos. Asimismo, no existe un marco claro para la participación de cooperativas y organizaciones independientes para la generación y venta de energía eléctrica
	<i>Límites a la operación de las energías renovables</i>	No existe un interés por fuentes alternativas.	Se plantea una serie de planes (CONUE y PAESE) para incrementar la eficiencia del consumo eléctrico, pero para fines financieros, más no ambientales.	Visión de corto plazo. Entre las barreras señaladas estaba la falta de incentivos fiscales, el orden de despacho de electricidad en privilegio del carbón y la falta de conocimiento sobre el potencial mareomotriz, geotérmico, biomasa, agronómico, solar y eólico de todo el país	Existen límites por la cancelación de las asignaciones para proyectos de energía renovable a partir del 2018. El sistema de subastas establecido por la CENECE se detuvo acusando falta de transparencia en la asignación
	<i>Tensiones</i>	Inconformidad gubernamental por el dominio de las empresas privadas	Comienza el cuestionamiento sobre la eficiencia de combustión tanto del carbón y el combustóleo. Inician críticas al sistema de financiamiento. El funcionamiento de la industria liderada por empresas privadas genera incertidumbre por el nivel de endeudamiento público	Iniciativa privada comienza a cuestionar el papel de PEMEX para garantizar el precio del gas. Por ello, acusan caída en las inversiones	Tensiones con la iniciativa privada por la falta de certeza en las inversiones. Por otro lado, existen múltiples conflictos territoriales por el despliegue de proyectos energéticos

Nivel	Características	1880-1937	1937-1992	1992-2013	2013
Micro	<i>Dependencia tecnológica</i>	Extranjera	Industria nacional	Industria nacional	Extranjera
	<i>Nivel de especialización técnica</i>	Baja	Bajo conocimiento del potencial hidroeléctrico	Especialización en hidroeléctricas y fuentes convencionales	Desarrollo privado de plantas eólicas y fotovoltaica
	<i>Nicho tecnológico</i>	Especialización en hidroeléctrica y termoeléctrica	Especialización en hidroeléctrica, posteriormente en combustóleo y carbón	Carboeléctricas y ciclo combinado	Eólicas, fotovoltaica, carboeléctrica, ciclo combinado
	<i>Conexión</i>	Diversidad de conexión	Reducción de la heterogeneidad al estandarizar las corrientes (de 50 a 60Hz)	Permite a productores con capacidad máxima de 20 MW para ofrecer sus excedentes a la red nacional.	Certificados de energía limpia
	<i>Institución de fomento tecnológico</i>	Ninguno	Instituto de Investigaciones Eléctricas (IEE) (1975)	Continúa el IEE	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
	<i>Núcleo de la transición</i>	Estabilidad de las inversiones privadas	Ley de la industria eléctrica y Nacionalización	Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica (1992)	Mercado minorista y mayorista
	<i>Dinámica de la innovación endógena</i>	Expansión del mercado interno	Homologación del sistema de generación	Programa de Transición Energética	Inversión de los generadores PIE en energía eólica y fotovoltaica
Factores coevolutivos	Tipo de transición	Transición de paisaje y régimen condicionado	Transición de gobernanza ampliada	Transición de ida y vuelta	Transición desregulada

Fuente: Elaboración propia

En la taxonomía general destaca los distintos elementos que determinan el núcleo de la transición y la generación de la innovación como un proceso endógeno. Durante la etapa inicial del SEM el cambio principal para la consolidación de la industria basada en hidroeléctrica y termoeléctrica fueron las decisiones del gobierno para permitir la estabilización de las primeras empresas. Por otra parte, la expansión de la economía nacional favoreció el crecimiento de las plantas eléctricas. Sin embargo, la naciente industria tuvo grandes dificultades por la falta de conocimiento técnico, el bajo nivel de financiamiento y la falta de recursos en los hogares para cubrir los recibos. Por lo cual, con base en el MMB, puede entenderse el proceso de *transición sociotécnica de paisaje y régimen condicionado*. El nombre considera el análisis multinivel donde los factores macro y meso limitan la expansión del sector.

Durante 1937-1992 la *trayectoria sociotécnica es de gobernanza ampliada* debido al rol clave que tuvo la dirección estatal para el desarrollo y coordinación del SEM. El proceso de nacionalización condujo a la estabilización de los nichos productivos de electricidad. De forma que, el núcleo de la transición se ubica en los marcos institucionales y la dinámica

endógena para el desarrollo de nuevas alternativas generadoras de electricidad es la estandarización del sistema de generación a 60 MW.

El periodo 1997-2013 responde a una *transición de ida y vuelta*. En efecto, la decisión de abrir el SEM a la iniciativa privada representó un cambio drástico en la trayectoria histórica causando que el gobierno diera mensajes cruzados para los nuevos participantes. Existió gran descoordinación entre las entidades públicas y las expectativas de los nuevos actores del mercado. En consecuencia, la diversificación de la producción no se dio al ritmo esperado. Aun con ello, se logró establecer una plataforma para el futuro. Por tanto, el núcleo de la transición puede ubicarse en la nueva estructura del SEM dictada en la Ley del Servicio Público (1992) mientras el Programa de Transición Energética estableció objetivos de mediano y largo plazo para motivar la innovación endógena.

El actual esquema en discusión de electricidad a raíz de la reforma del 2013 se caracteriza como una *transición desregulada*. La nueva trayectoria desde 1997 sirvió de plataforma para la estabilización de los nuevos nichos tecnológicos, principalmente eólico y fotovoltaicos. El principal instrumento en el núcleo de transición es la creación de un mercado formal (mayoristas y minoristas) para la venta y generación de electricidad renovable. Adicionalmente, el núcleo de innovación endógena es la consolidación de una estrategia institucional para el impulso de las fuentes alternativas favoreciendo el crecimiento sostenido de la capacidad instalada eólica y fotovoltaica.

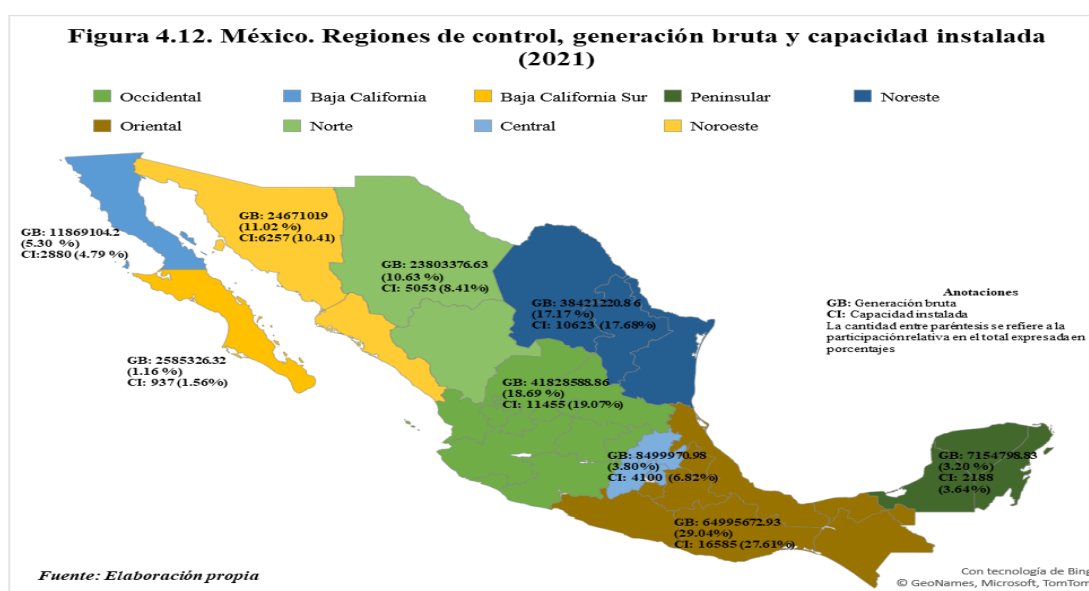
Desde el año 2022, el poder ejecutivo intenta impulsar medidas para incrementar la participación del sector público en la generación de electricidad. Las propuestas han sido frenadas por el congreso. Ante dicha la negativa, durante 2023, se logró un acuerdo con Estados Unidos para invertir 5,000 millones de dólares en tres plantas solares en Sonora cuya gestión queda en manos de la CFE. En contra parte, se adquirieron 13 plantas de consumo energético fósil a la empresa española Iberdrola e incrementar la generación pública hasta el 55%. Ambas decisiones muestran la necesidad de recuperar la rectoría de la producción e implementar una transición de tipo gobernanza ampliada y tipo ida-vuelta. Es decir, el

gobierno dirige la dinámica del sector de forma preponderante, pero al mismo tiempo sigue impulsando las fuentes fósiles.

4.2. La bioeconomía del sector eléctrico de México: el desempeño entrópico de la transición

4.2.1 Arquitectura general del SEM

El SEM está integrado por 9 regiones de control y despacho que cubren el territorio nacional. La figura 4.12 muestra la capacidad instalada y generación bruta de cada centro principal de actividad. Para el año 2021 la región Oriental⁷³ concentra la mayor proporción en ambos rubros representando el 29.9% y 27.6% respectivamente, es decir, cerca de la tercera parte de la actividad nacional se concentra en esta región seguido de la zona Occidental⁷⁴, Noreste⁷⁵, Noroeste⁷⁶, Norte⁷⁷, Centro⁷⁸, Baja California, Peninsular⁷⁹ y Baja California Sur.



⁷³ Integra Chiapas, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Puebla, Tabasco, Tlaxcala y Veracruz

⁷⁴ Incluye Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas

⁷⁵ Integra Coahuila de Zaragoza, Nuevo León y Tamaulipas

⁷⁶ Incluye Sinaloa y Sonora

⁷⁷ Integra Chihuahua y Durango

⁷⁸ Incluye Ciudad de México, Estado de Hidalgo, Estado de México

⁷⁹ Integra Yucatán, Campeche y Quintana Roo

En cuanto su composición desagregada, tal como se mostró en la gráfica 4.1, el sector público ha disminuido su participación en la generación de electricidad de manera sistemática y el sector privado gana terreno de manera fuerte. Con información del Observatorio de Transición Energética, la iniciativa privada, para el año 2022 concentró el 63% de la generación eléctrica y el 63% de la capacidad instalada en el país. En total, este segmento empresarial posee 670 plantas de generación.

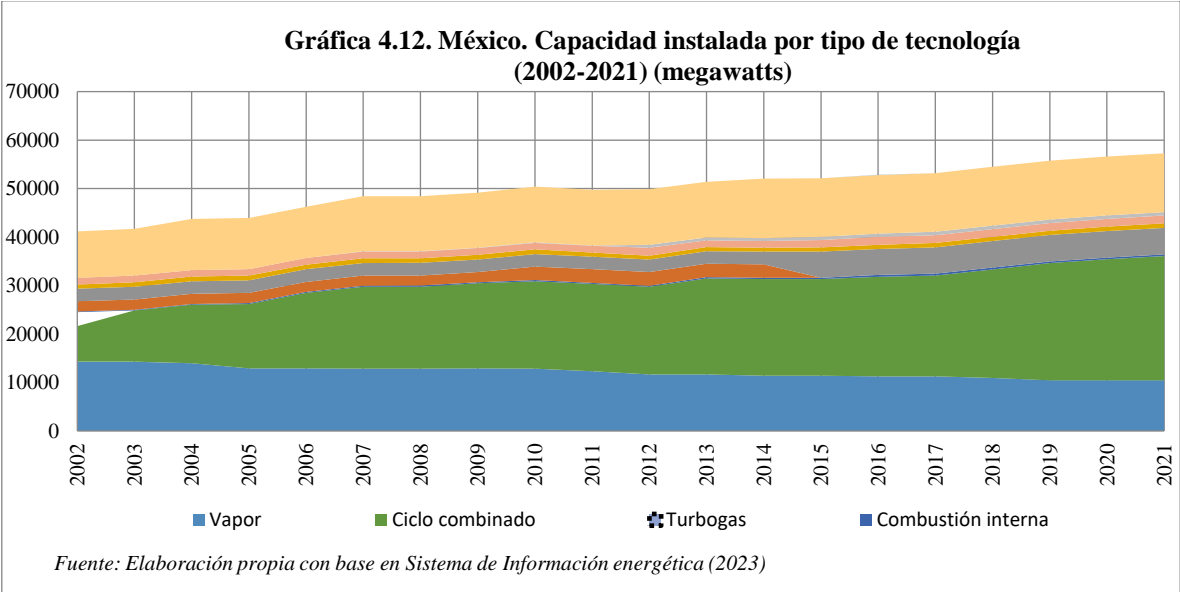
En contraparte, la apertura de la generación ha contrarrestado el posicionamiento del sector público a tan solo 197 plantas generadoras que en conjunto poseen cerca del 39% de la generación y aproximadamente el 37% de la capacidad instalada tal como ilustra el gráfico 4.8. Estas cifras corresponden a stock de centrales en funcionamiento, por lo que difiere de ser una variable de flujo. Es decir, se trata del actual acervo productivo del SEM.

La capacidad instalada es un directamente vinculado a la generación. La gráfica 4.12 muestra la tendencia durante los últimos 19 años en este rubro. En cuanto la energía fotovoltaica su participación comenzó a reflejarse hasta 2012 manteniendo una participación constante hasta 2021. De manera contraria, la tecnología dual tuvo un crecimiento hasta 2014 la cual había tenido un crecimiento sostenido de 2.36%.

Respecto a las tecnologías que hacen uso de energía renovable⁸⁰, la más dinámica es la eólica. Durante el periodo creció 35.5% en promedio anual situándose de manera contundente como la de mayor expansión. En el rubro de energías limpias es seguido de manera lejana por la hidroeléctrica, nucleoelectrica y geoelectrica con tasas de crecimiento promedio anual de 1.23%, 0.87% y 0.64% respectivamente. Asimétricamente, las tecnologías

⁸⁰ De acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica, las fuentes limpias para generar electricidad son: Viento, radiación solar, energía oceánica, bio-energéticos, energía generada por el aprovechamiento del poder calorífico del metano y otros gases asociados en los sitios de disposición de residuos, granjas pecuarias y en las plantas de tratamiento de residuales, energía generada por el aprovechamiento del hidrógeno mediante su combustión o su uso en celdas de combustible, energía proveniente de centrales hidroeléctricas, energía nucleoelectrica, energía generada con los productos del procesamiento de esquilmos agrícolas, energía generada por centrales de cogeneración eficiente, energía generada por ingenios azucareros, energía generada por centrales térmicas con procesos de captura y almacenamiento geológico y tecnologías consideradas de bajas emisiones de carbono conforme a estándares internacionales. Asimismo, las tecnologías clasificadas como renovables son geoelectrica, nucleoelectrica, eólica, hidroeléctrica y fotovoltaica.

cuya fuente energética es fósil mantienen tasas superiores. El ciclo combinado lidera con un crecimiento de 6.8% en promedio seguido de la combustión interna con 4.87% y carboeléctrica expandiéndose en promedio 3.99%.



La diferencia entre las tasas de crecimiento promedio anual respecto la capacidad instalada de energías renovables y fuentes convencionales refleja que la expansión de esta primera es principalmente influida por la dinámica del sector eólica mostrando una diferencia considerable con el resto de las tecnologías. En cambio, las fuentes convencionales mantienen tasas de expansión más equilibradas entre sí y con mayor dinámica durante el lapso de tiempo. Un elemento que puede potenciar la estabilidad de las energías renovables podría ser equilibrar las tasas de crecimiento de la capacidad instalada entre las mismas.

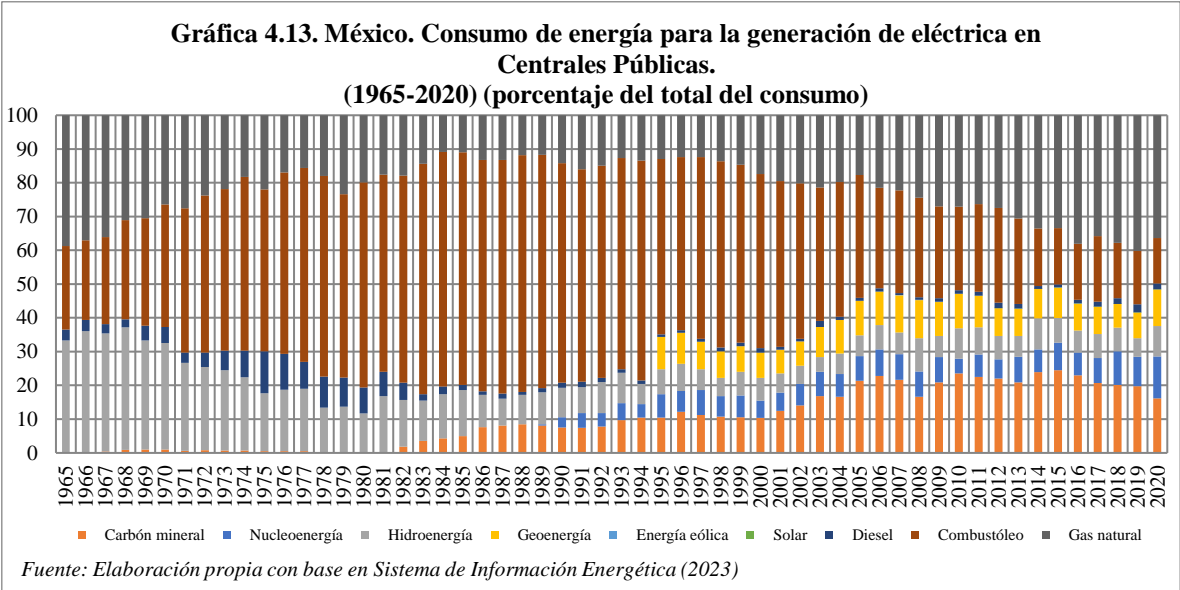
4.2.2 Desempeño energético del SEM

4.2.2.1 Centrales públicas

Un análisis bioeconómica implica una comprensión de los componentes tecnológicos, energéticos, económicos y sociales del SEM. En específico, uno de los elementos para evaluar el desempeño energético y ambiental de una estructura productiva son los

combustibles utilizados como insumos y las emisiones contaminantes producidas en la generación de su actividad principal.

Como se apuntó en la primera sección del capítulo, la conformación del SEM permitió la apertura a nuevas modalidades de generación eléctrica que coadyuven con la estructura pública. En el caso de la estructura históricamente dominante, la figura 4.13 muestra el porcentaje de participación relativa de cada combustible utilizado en las centrales públicas.



Tal como se vino señalando, la época de auge de la hidroenergía disminuyó considerablemente frente a gas natural y el combustóleo. En 1988 el combustóleo representó el 70.8%, el gas 11.8% y el carbón cerca del 9%. Es decir, mientras las fuentes fósiles dominaron completamente la generación eléctrica pública, otras fuentes como la hidroeléctrica pasó del 36% en 1969 a menos del 10% en menos de 20 años.

De manera paulatina el combustóleo disminuyó su participación relativa debido a al incremento del carbón, el gas natural y las fuentes alternativas. De inicios del siglo XX hasta 2019 el carbón creció a una tasa anual promedio de 3.37% mientras el gas natural en el mismo plazo lo hizo en 2.93 puntos porcentuales. Respecto a fuentes renovables, el sector público únicamente hace uso de energía nuclear, geotérmica y agua. Durante el año 2020 la

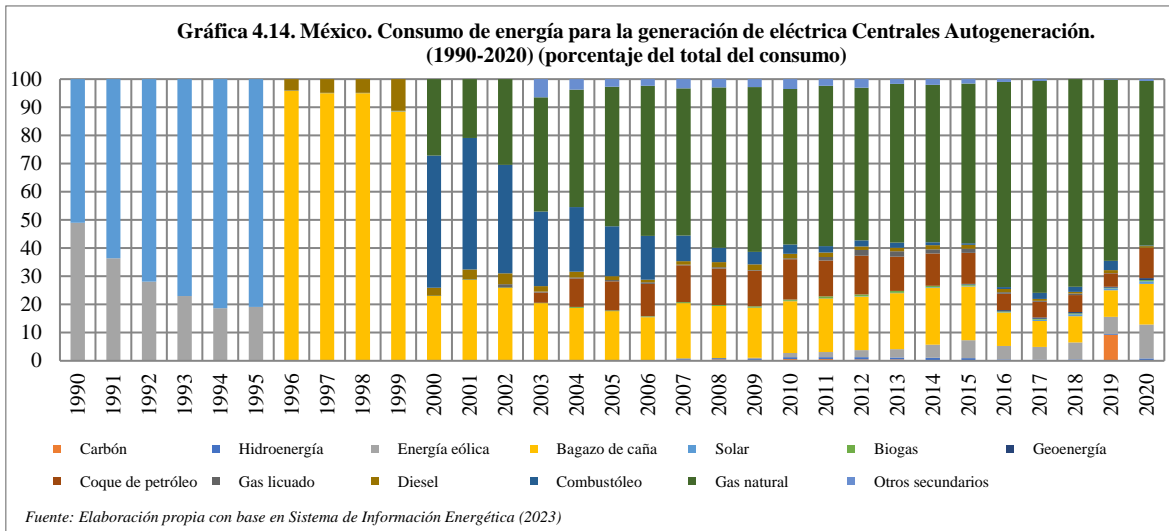
generación nucleoelectrica representó el 12.3%, geoelectricidad participa con el 10% y la tradicional hidroeléctrica mantiene su proporción desde la década de los 80's con el 9%.

4.2.2.2 Centrales de Autogeneración

En cuanto la modalidad de autogeneración su participación tiene presencia en el sector desde los años 90's. A diferencia de las centrales eléctricas públicas, los integrantes de la modalidad de autogeneración han impulsado el rol de fuentes alternativas. En el transcurso de 1990-1995 únicamente hicieron uso de energía solar y eólica. Tal como se apuntó en el primer apartado, la falta de coordinación entre PEMEX y CFE para la proveeduría de gas condujo a replantear los principios de la Ley de la Industria e impulsar el financiamiento a través de PIDIREGAS. El inicio de estos nuevos proyectos se dificultó por la disponibilidad energética.

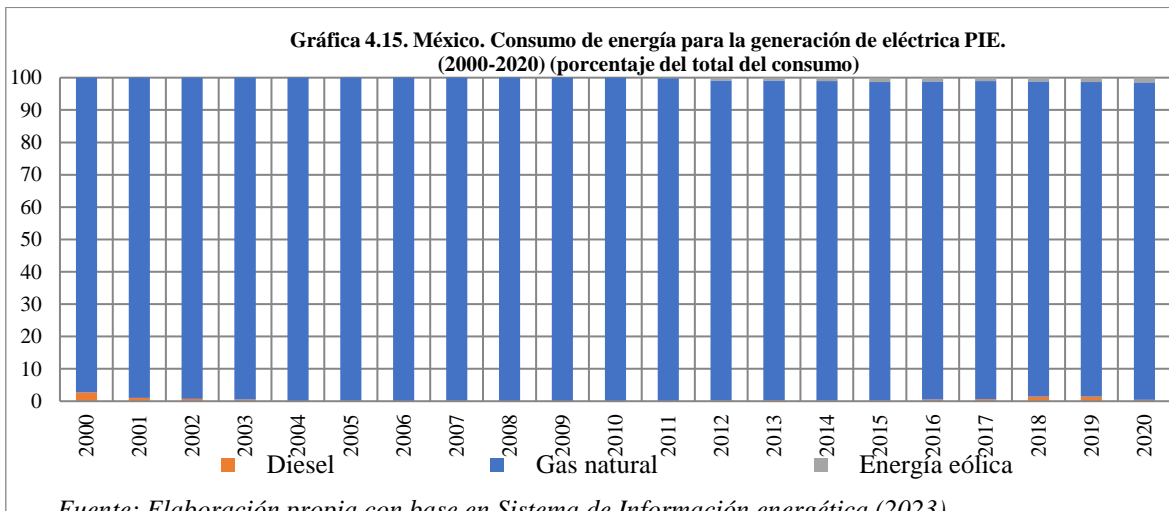
En efecto, como se ilustra en la gráfica 4.14 durante la mitad de la década de los 90's hasta el año 2000 se transitó hacia el bagazo de caña y en una proporción reducida, en promedio del 5%, el diésel. Asimismo, el comportamiento se asemejó al mismo que la industria pública nacional con el uso de combustóleo hasta en 46% durante 2001 y gas natural. Este último ha incrementado su participación relativa como combustible al dominar en promedio 71.5 % durante 2016-2020.

Como puede observarse, el uso de combustibles dentro de las centrales de autogeneración no refleja todavía los objetivos señalados dentro de las reformas de 1992 y 2013. Si bien los elementos de la Ley de Industria Eléctrica y la Ley de Transición Energética señalan el papel de estos productores para impulsar la descarbonización del sector, no se refleja aún en la dinámica y composición por tipo de combustibles.



4.2.2.3 Centrales Productores Independientes de Energía (PIE)

A diferencia de los productores de autogeneración, las centrales PIE fueron el objeto directo de la diversificación de inversiones a través de PIDEREGAS, además de vincular fuertemente con la creación de CENEGAS como institución organizada de proveer gas natural a la industria. La gráfica 4.15 muestra el consumo energético dominado completamente por el gas natural mientras marginalmente, con el 20%, está la energía eólica y diésel. A diferencia de las dos modalidades restantes, la PIE a través de su consumo reduce el peso de combustibles fósiles al usar una fuente considerada limpia.



4.2.2.4 Emisiones contaminantes

El siguiente elemento relevante desde una perspectiva bioeconómica es la relación actividad productiva-emisiones contaminantes. Desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte, no basta simplemente con el desarrollo tecnológico para asegurar una transición sociotécnica exitosa, debe existir además una valoración del proceso económico como un ciclo generador de emisiones, contaminantes y pérdidas energéticas. Tal como se ha insistido en capítulos previos, la economía siempre es entrópico.

Para el sector generador de electricidad es posible contar con información sobre las emisiones contaminantes: dióxido de carbono, metano y óxido de nitrógeno. El periodo disponible de información va de 1990-2020. A fin de distinguir los intervalos donde se gestaron modificaciones institucionales y normativas, se analiza la evolución en subperiodos.

Tabla 4.3 México. Emisiones contaminantes generadas en el sector eléctrico, (periodos seleccionados) (1990-2020)

Periodo	Dióxido de carbono (CO2)			Metano (CH4)			Óxido de nitrógeno (N2O)			Emisiones netas		
	Tasa de crecimiento	Media de crecimiento	Coefficiente de variación	Tasa de crecimiento	Media de crecimiento	Coefficiente de variación	Tasa de crecimiento	Media de crecimiento	Coefficiente de variación	Tasa de crecimiento	Media de crecimiento	Coefficiente de variación
1990-2000	5.58	5.86	1.37	7.43	7.90	1.33	7.01	7.30	1.13	5.59	5.86	1.37
2001-2011	1.58	1.89	2.97	-0.72	-0.28	-22.69	-0.24	0.57	14.54	1.57	1.88	2.97
2012-2020	-0.49	0.40	21.34	-1.41	0.95	12.60	-5.52	-3.19	-3.78	-0.50	0.39	21.67
1990-2020	2.50	2.76	2.72	2.34	2.82	3.57	1.15	1.68	6.04	2.50	2.76	2.72

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (2022)

De acuerdo con la tabla 4.3, las emisiones de metano fueron las de mayor crecimiento promedio anual (7.43%) durante 1990-2000, seguidas por el óxido de nitrógeno (7.01%) y dióxido de carbono (5.58%). Vinculando con la sección previa, durante esta etapa las centrales públicas y centrales de autogeneración dominaron la producción eléctrica basadas principalmente con insumos. A pesar del uso de energía eólica y solar por parte de los productores de autogeneración, las emisiones en los tres rubros fueron las más altas durante este periodo (5.59% en promedio anual en su conjunto) ligado al dominio del sector público y las tecnologías convencionales.

El periodo de declive fue durante 2001-2011. En particular, las emisiones de metano y óxido de nitrógeno disminuyeron su crecimiento en 0.72% y 0.24% en promedio anual, mientras las emisiones de CO₂ siguieron contribuyendo, aunque a un ritmo menor (1.58%). Los años del 2012-2020 ha sido significativamente favorable para la reducción de todas las emisiones en su conjunto. Destaca la disminución de emisiones del tipo N₂O en 5.52% en promedio anual seguido de CH₄ cuya participación descendió en 1.41% en promedio por año. En este mismo las emisiones de CO₂ por primera vez disminuyeron de manera anual al ritmo de 0.49%.

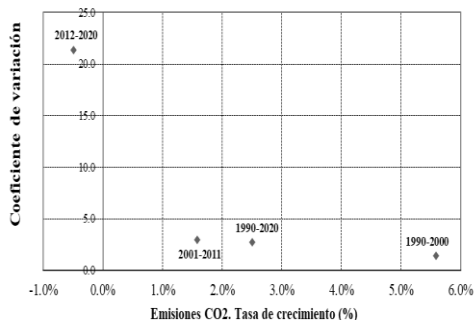
Es visible las mejoras en términos de emisiones durante los últimos 8 años en el SEM. Gracias a esta dinámica el promedio del periodo es del 2.5% para el conjunto de emisiones, significativamente más bajo que el generado por las centrales públicas durante la última década del siglo XX. Durante este periodo, los productores independientes ganaron presencia en la producción y puede haber incidido favorablemente en la disminución, además del conjunto de acuerdos institucionales y arreglos entre actores para facilitar la difusión de tecnologías con menor daño ambiental en términos de emisiones.

Con relación al coeficiente de variación este estadístico permite identificar diferencias sustanciales entre la media y la desviación estándar de cada población. Específicamente, al estar abordando al conjunto de emisiones resulta interesante analizar su variabilidad individual respecto a la tendencia total con la finalidad de focalizar sobre el tipo de emisión en específico sobre el cual debe enfocarse el desempeño del sector y reforzar la evidencia sobre el lapso de tiempo más favorable para le disminución de emisiones.

En las gráficas 4.16-4.19 se muestra la relación entre el coeficiente de variación y las tasas de crecimiento por tipo de emisión. En el caso de emisiones tipo CO₂, es clara la relación inversa entre ambos estadísticos para el periodo 2012-2020. En otras palabras, a medida que decrecen las emisiones el término de variación incrementa. Por lo cual, este periodo de tiempo, incluyendo los elementos económicos, políticos, institucionales y legales

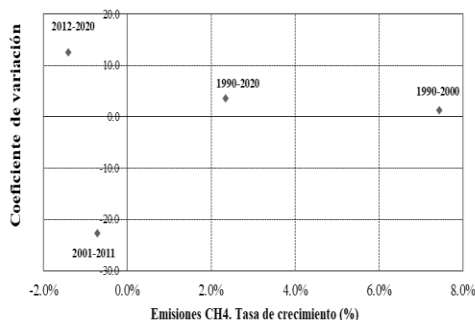
que se presentaron en la primera parte del capítulo, rompieron con la tendencia en el tiempo que tenía el desempeño eléctrico respecto a emisiones de dióxido de carbono.

Gráfica 4.16. México. Emisiones de CO2. Tasa de Crecimiento y Dispersión. Periodos 1990-2020. (Porcentaje y Coeficiente de variación)



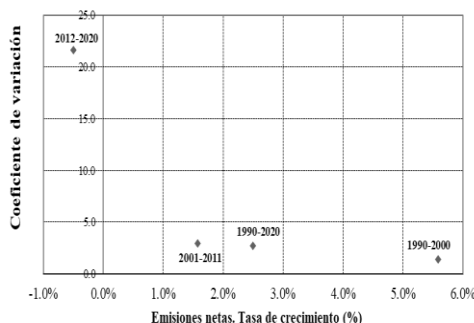
Fuente: Estimación propia con datos del Inventario de Emisiones de gases y Compuestos (2022)

Gráfica 4.17. México. Emisiones de CH4. Tasa de Crecimiento y Dispersión. Periodos 1990-2020. (Porcentaje y Coeficiente de variación)



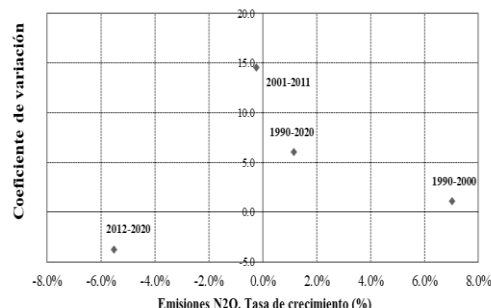
Fuente: Estimación propia con datos del Inventario de Emisiones de gases y Compuestos (2022)

Gráfica 4.18. México. Emisiones Netas. Tasa de Crecimiento y Dispersión. Periodos 1990-2020. (Porcentaje y Coeficiente de variación)



Fuente: Estimación propia con datos del Inventario de Emisiones de gases y Compuestos (2022)

Gráfica 4.19. México. Emisiones de N2O. Tasa de Crecimiento y Dispersión. Periodos 1990-2020. (Porcentaje y Coeficiente de variación)



Fuente: Estimación propia con datos del Inventario de Emisiones de gases y Compuestos (2022)

Las perspectivas entre ambos indicadores siguen la misma relación en las emisiones de CH4 y N2O. En el primer caso, la tendencia comienza gradualmente desde el 2001 y se intensifica hasta 2020, similarmente para emisiones N2O donde la disminución de emisiones en 2001 sirvió de trayectoria para los años de 2012-2020, por lo cual, el coeficiente de variación decrece en este intervalo.

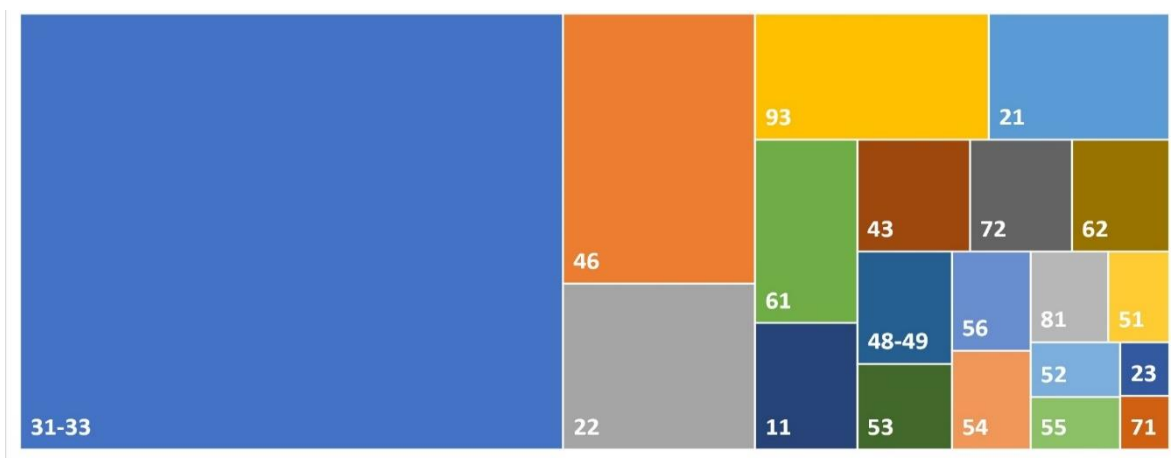
Así, las emisiones de óxido de nitrógeno por mayor tiempo han construido una tendencia estable hacia la disminución, en segundo lugar, las emisiones de metano y recientemente las correspondientes a dióxido de carbono toman una trayectoria decreciente en los últimos años dentro de la nueva estructura del mercado eléctrico.

4.2.3. Relevancia económica del SEM

4.2.3.1 Valor bruto de la producción

El SEM, tal como se presentó al inicio del capítulo, es relevante para el funcionamiento del resto de sectores de la economía pues su producto es insumo y fuente energética vital desde el encendido de una bombilla en un hogar hasta la puesta en marcha de un complejo industrial. Esta proporción en términos de energía (gráfica 4.3) se expresa en gasto monetario por parte de los sectores. En la gráfica 4.20 se muestra el gasto que realizan las ramas de la economía⁸¹ de acuerdo con la clasificación de INEGI.

Gráfica 4.20. México. Gastos de los sectores en compras al servicio eléctrico (2018) (Millones de pesos constantes del 2013)



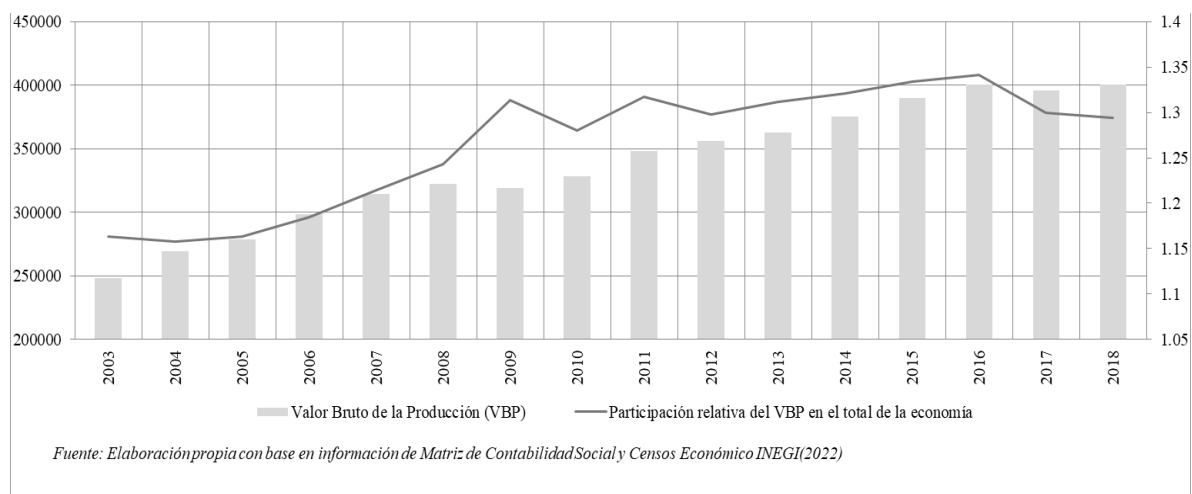
Fuente: Elaboración propia con base en información de Matriz de Contabilidad Social (2018) y Censos Económicos INEGI (2019)

⁸¹ Corresponde a la clasificación a dos dígitos (ramas) de Sistema de Cuentas Nacionales: 31-33 Industrias manufactureras; , 46 Comercio al por menor; 22 Generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, suministro de agua y de gas natural por ductos al consumidor final; 93 Actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales; 21 Minería; 61 Servicios educativos; 11 Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza; 43 Comercio al por mayor; 72 Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas; 62 Servicios de salud y de asistencia social; 48-49 Transportes, correos y almacenamiento; 53 Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles; 56 Servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos, y servicios de remediación; 54 Servicios profesionales, científicos y técnicos; 81 Otros servicios excepto actividades gubernamentales; 51 Información en medios masivos; 52 Servicios financieros y de seguros; 55 Corporativo; 23 Construcción; 71 Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos

De acuerdo con la metodología de la Matriz de Contabilidad Social que produce el INEGI, cada una de las ramas realiza compras (gastos) al resto de sectores. Es decir, las relaciones al interior pueden interpretarse como el grado de dependencia de la economía sobre un sector en específico. En términos de gasto, la rama de industrias manufactureras realizaron el mayor gasto al sector eléctrico durante 2018 con un monto alrededor del 152,012.39 millones de pesos constantes (mdp) representando el 47% de las ventas del sector. Con una diferencia notable sigue el comercio al por menor cuyo gasto fue 33, 263.25 mdp (10.3% del total del sector eléctrico). Por el contrario, las ramas de menor gasto fueron la vinculada a servicios de esparcimiento cultural y la rama de construcción (0.53% y 0.52% de los ingresos de la industria eléctrica).

En materia del valor bruto de la producción generada por el sector eléctrico, en términos reales con base en el mismo sector tuvo un ligero estancamiento durante 2008-2010 y se recuperó progresivamente hasta 2018, no sin antes presentar el nivel más elevado en 2016. Sin embargo, esta magnitud en términos porcentuales con relación al resto de la economía es constante. En efecto, la gráfica 4.21 indica una proporción constante y en promedio de 1.26% del valor bruto de toda la economía.

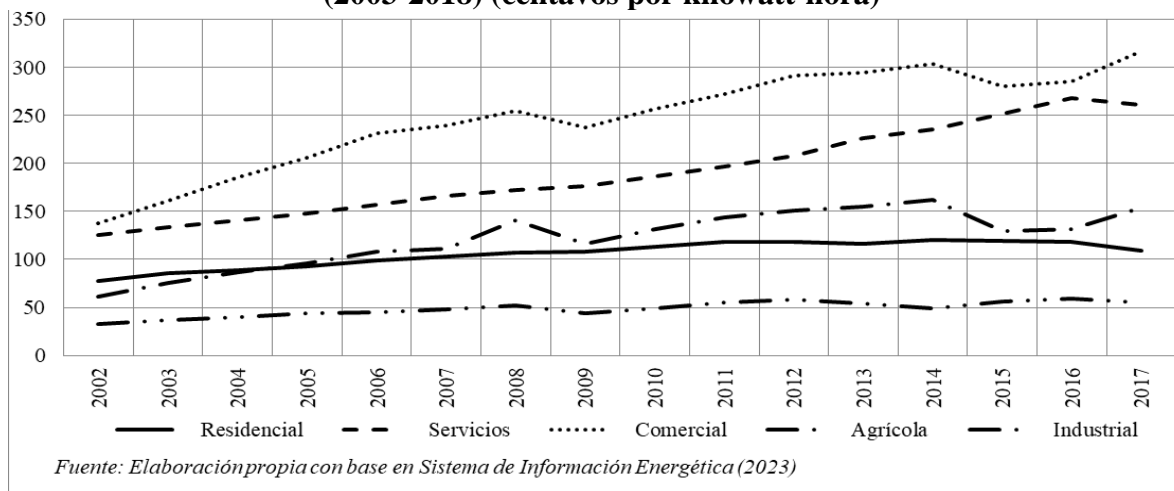
Gráfica 4.21. México. Evolución y participación del valor bruto de la producción del SEM (2003-2018) (Millones de pesos constantes y %)



4.2.3.2 Precios medios por sector y tarifas

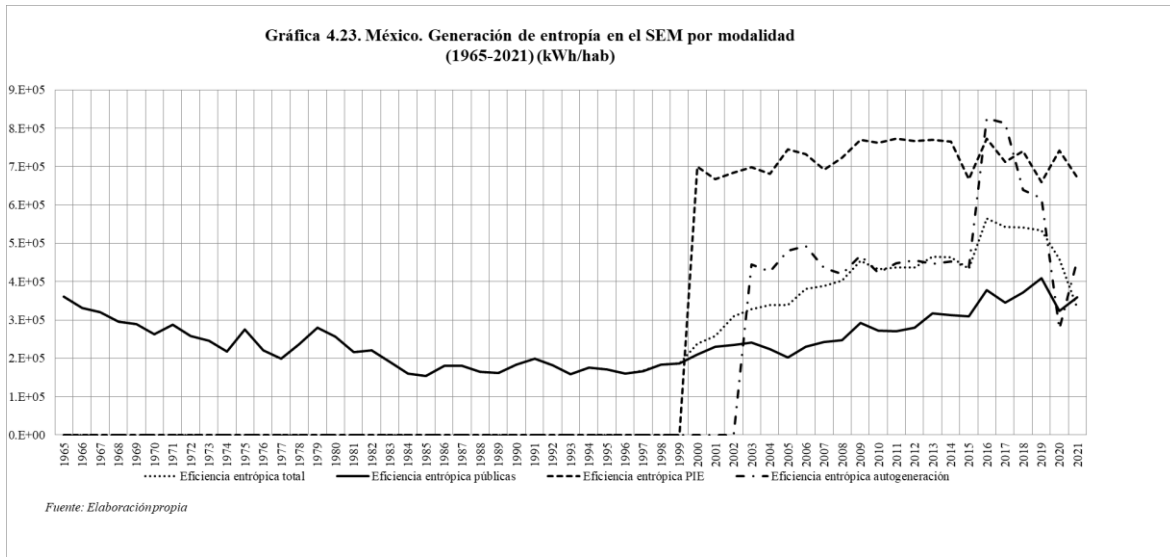
Un aspecto clave en la demanda del SEM es el precio de la electricidad a la cual se vende a los distintos sectores tarifarios pues representa un elemento directo sobre el ingreso de los hogares y diferentes usuarios. En el gráfico 4.22 se muestra la tendencia del precio durante 2002-2017. El sector a quien se le vende más caro el servicio eléctrico es el comercial mientras el sector agrícola es quien menos ingreso dispone para la adquisición. Durante el año 2019 hubo un descenso en el precio al igual que durante 2015. Sin embargo, fue notable para el sector comercial e industrial. En los últimos años comenzó una trayectoria creciente para ambos sectores.

Gráfica 4.22. México. Evolución del precio de electricidad por sector tarifario (2003-2018) (centavos por kilowatt-hora)



4.2.4 Evaluación entrópica del SEM

El transcurso del capítulo se ha insistido en la importancia del factor entrópico en cada una de las formas de generación eléctrica. En la discursiva sobre la transición se enfatiza principalmente en la necesidad de impulsar las fuentes renovables de producción eléctrica. Si bien representan una alternativa viable ante el desarrollo de fuentes fósiles, también generan un desgaste energético importante que debe tomarse en cuenta al momento de evaluar la factibilidad de estos nichos.



En la gráfica 4.23 se muestra la estimación de generación entrópica medida en megajulios por kelvin (MJ/K). Esta medición es una escala de entropía molar⁸² asociada a cada insumo energético consumido por modalidad de generación eléctrica. Hasta el año 2000 la única fuente de generación eran las terminales públicas. Sin embargo, la consolidación de centrales PIE y de autogeneración, a pesar de principalmente hacer uso de tecnologías con base en fuentes limpias, muestran un gran impacto en términos entrópicos.

Particularmente, las centrales PIE superan la generación entrópica a partir del año 2004 y mantienen una tendencia ascendente. Como se ha señalado, este tipo de modalidad representa un caso híbrido de generación pues se trata de actores asociados con el gobierno para generar electricidad. Por tanto, las fuentes de insumo para su producción son similares.

⁸² Para su estimación se utilizó la metodología de medición entrópica por combustión. La fórmula es desarrollada por Goßling (2002) y Yavad (2018). La ecuación relaciona los cambios de la entropía $\Delta S = \Delta S_r^0 + \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_p(T)dT}{T}$. ΔS representa la entropía del insumo energético i , donde T_f representa la temperatura a la cual se transforma el insumo en calor y $C_p(T)$ representa la equivalencia molar del insumo energético. Debido a que el Sistema de Información Energética (SIE) dispone del consumo por tipo de insumo energético, es posible aplicar esta fórmula para obtener la entropía generada por modalidad. Basta contar con los valores molares promedio de cada insumo y realizar la conversión de petajoules (unidades en que se expresa en consumo energético en el SIE) a unidades molares y realizar el cálculo para obtener su equivalencia en entropía molar.

En el caso de la modalidad de autogeneración, sus valores son constantes, pero en 2015 comienza el ascenso, posiblemente explicado por las reformas del 2013 que liberalizaron al sector.

La consideración del nivel entrópico permite obtener resultados acerca del desempeño energético que representa la actual estructura eléctrica de México. Destaca los niveles de contaminación generada por la modalidad PIE con relación al nivel reportado de las centrales públicas. Al mismo modo, la modalidad de autogeneración, es decir, modelo de generación de baja escala sin algún convenio gubernamental es la estructura de menor impacto entrópico. Así, es posible cuestionar con variables estrictamente energéticas si el desarrollo de formas alternativas para generar electricidad realmente cumple con los objetivos planteados. El actual desempeño de la estructura pública y la modalidad mixta no están contribuyendo a la reducción de emisiones.

Bibliografía

1. Bacon, R. W., & Besant-Jones, J. (2001). Global electric power reform, privatization, and liberalization of the electric power industry in developing countries. *Annual review of energy and the environment*, 26(1), 331-359.
2. Blanco, M., y Moncada, J. (2011). El Ministerio de Fomento, impulsor del estudio y el reconocimiento del territorio mexicano (1877-1898). *Investigaciones geográficas*, (74), 74-91.
3. Cámara de Diputados (2007). Situación financiera de Luz y Fuerza del Centro. Disponible en www.cefp.gob.mx/Fintr/Fedocumentos/Fpdf/Fcefp/Fcefp0972007.pdf
4. Cárdenas, E. (2015). *El largo curso de la economía mexicana*. Fondo de Cultura Económica
5. Carreón, V. (2010). La arquitectura de mercado del sector eléctrico mexicano. Centro de Investigación y Docencia Económicas.
6. Centro de Investigación Económica Presupuestaria (2022). Transición Energética: Un reto para las finanzas públicas. Disponible en <https://ciep.mx/transicion-energetica-un-reto-de-las-finanzas-publicas/>

7. Carreón-Rodríguez, V. G., Jiménez, A., & Rosellón, J. (2005). *The Mexican electricity sector: Economic, legal and political issues*. Centro de Investigación y Docencia Económicas.
8. Checa, M. y Sunyer, M. (2019). Los valores de un paisaje industrial emblemático de México, el sistema hidroeléctrico de Necaxa, Puebla. *Revista Gremium*, 6(12), 8-27.
9. De la Garza, E. (1994). *Historia de la industria eléctrica en México, Volumen 1*. Universidad Autónoma Metropolitana.
10. De la Peña, S., & Aguirre, T. (2006). *De la revolución a la industrialización* (Vol. 4). Universidad Nacional Autónoma de México.
11. Díaz-Bautista, A. (2005). El cambio estructural y la regulación del sector eléctrico mexicano. *Múnich: Industrial Organization*. Recuperado de: <https://ideas.repec.org/p/wpa/wuwpio/0504011.html>.
12. Kuntz Ficker, S. (2010). Historia económica general de México. *De la colonia a nuestros días, México, El Colegio de México, Secretaría de Economía*.
13. Ovalle Favela, J. (2007). La nacionalización de las industrias petrolera y eléctrica. *Boletín mexicano de derecho comparado*, 40(118), 169-191.
14. Ramos-Gutiérrez, L. D. J., & Montenegro-Fragoso, M. (2012). Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(2), 103-121.
15. Rodríguez, V. (2016). Industria eléctrica en México: tensión entre el Estado y el mercado. *Problemas del desarrollo*, 47(185), 33-55.
16. Rodríguez-Mata, E. (1950). Generación y distribución de energía eléctrica en México, periodo 1939-1949. Banco de México.
17. Tannenbaum, F. (1951). México, la lucha por la paz y por el pan. *Problemas agrícolas e industriales de México*, 3(4), 151.

**CAPÍTULO 5. EL FUTURO DEL SECTOR ELÉCTRICO DE MÉXICO: UNA
PROPUESTA DE SIMULACIÓN EMPÍRICA DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA**

Introducción

El objetivo del capítulo es presentar una propuesta de simulación para representar la dinámica del Sector Eléctrico Mexicano (SEM), particularmente identificar los factores que incidirían sobre la transición socioambiental, la evolución de las tecnologías de energía renovable, el desempeño de las fuentes fósiles y el nivel de generación entrópico en el tiempo. De manera específica, se realizan una serie de simulaciones para demostrar que la transición sociotécnica del SEM es un fenómeno emergente resultado de una complejidad organizada cuya particularidad se debe al contexto cambiante e históricamente determinado.

El proceso de transición energética del SEM se caracteriza por ser dinámico en el tiempo, además involucra a una serie de actores, instituciones, reglas y normas que se desarrollan a un nivel micro-meso-macro. Por ello, a partir de la metodología de Modelos Basados en Agentes, se presenta un modelo empírico que responde a la naturaleza del planteamiento teórico descrito en el capítulo 2 y representa la dinámica del Modelo Multinivel Bioevolutivo.

Considerando la capacidad innovadora y heterogénea entre las firmas, el modelo reconoce el consumo energético y el desempeño entrópico de cada tecnología para la generación de electricidad, la capacidad del entorno meso para crear derramas del conocimiento, la gobernanza de la innovación, la estructura de mercado, los incentivos gubernamentales para las nuevas inversiones y los posibles conflictos socioambientales.

Los escenarios para la simulación contemplan tres trayectorias: 1. Esquema actual de generación, 2. Gobernanza de la transición, 3. Generación distribuida. La primera tendrá como criterios de evaluación los niveles de entropía y de emisiones CO₂. La segunda trayectoria propone como instrumentos el cambio en el orden de proveeduría de electricidad a partir del orden de mérito. La tercera simulación se instrumentaliza con una tarifa de conexión Feed-in Tariff. De manera conjunta, las trayectorias se evalúan en términos económicos (evolución de los precios y nivel de producción eléctrica limpia-fósil), criterios ambientales (generación entrópica y emisiones de CO₂) y parámetros sociales (participación

de pequeñas comunidades y organizaciones en la generación eléctrica). Con las tres dimensiones, se obtiene una dimensión socioambiental de la transición.

5.1. Modelos Basados en Agentes: una alternativa para modelar un mundo complejo, evolutivo y bioeconómico

5.1.1 La importancia de la teoría del equilibrio para la economía

La evolución de las ciencias económicas se ha conducido por distintas rutas ontológicas, epistemológicas y metodológicas para abordar los diversos fenómenos que preocupa a cada corriente⁸³. En la economía, la corriente neoclásica se consolidó como el punto central de la enseñanza académica e implementación de las políticas públicas.

Como se apuntó en el capítulo 2, la influencia de la mecánica clásica y el cálculo diferencial limitaron el campo epistemológico de la disciplina para centrarse en la búsqueda de leyes generales que expliquen el funcionamiento del mercado, la coordinación de decisiones entre compradores y vendedores. De tal forma, la sociedad, el individuo, el mercado y el sistema de precios se redujeron a expresiones matemáticas que representaran los supuestos de racionalidad perfecta, información completa y la convergencia hacia el equilibrio. Así, la economía neoclásica basada en el método inductivo⁸⁴ estableció una ruta disruptiva en la metodología.

En efecto, el desarrollo de la economía neoclásica representó un cambio de paradigma al partir de una serie de postulados para construir sus inferencias. Gracias al método positivista⁸⁵, de acuerdo con Bunge (1975), las ciencias sociales ganaron en su

⁸³ Desde la perspectiva de Spash (2020), el debate dentro de las corrientes económicas debe identificar profundamente las diferencias entre los tres conceptos señalados para entender el campo analítico de cada corriente en la economía. La ontología se hace preguntas sobre lo que existe, las principales entidades de interés en un campo de investigación, así como cuáles son sus características y relaciones generales. Epistemología tiene que ver con las bases teóricas sobre las cuales se crea el conocimiento del mundo. Se trata de teorías sobre el origen y los límites del conocimiento. Describe cómo podemos formar conocimiento sobre el mundo y qué significa conocer verdaderamente algo. Metodología, tiene relación con los razonamientos sobre la forma de llevar a cabo una investigación. Es el conjunto de herramientas de la investigación científica forman los métodos.

⁸⁴ Se refiere al procedimiento científico que parte de la observación y experimentación para llegar a una conclusión general.

⁸⁵ Utilizando la definición de Katouzain (1980) este método aplicado a la economía se refiere a la observación parcial del fenómeno para formular hipótesis primarias a través de deducciones lógicas que dan lugar a teorías generales. Luego la teoría se pone a prueba mediante método de observación. Si las pruebas se validan, las hipótesis se aceptan y la teoría es verificable

implementación al contar con metodología uniforme que permite delimitar su objeto de estudio, contar con técnicas especializadas e implementar análisis empíricos para contrastar sus principales postulados⁸⁶.

El método neoclásico garantiza la correspondencia de cada fenómeno económico a raíz de una causa económica establecida en los microfundamentos, delimitando perfectamente las relaciones causales y los mecanismos que permiten la convergencia de los mercados al equilibrio. Los fenómenos económicos parten de un método lógico y logran validez para la teoría económica a partir del método empírico (Koopmans, 1980). La teoría representa a los individuos a través de un lenguaje establecido por definiciones, afirmaciones o descripciones que se conectan a los fenómenos observables.

El principal instrumento y el cual consolidó a la economía neoclásica es la teoría del equilibrio general competitivo. Esta noción ha estado presente desde Adam Smith en *La riqueza de las Naciones* (1776), quien establece la existencia de un mecanismo que permite compatibilizar el consumo y la producción atribuida metafóricamente a la mano invisible de los mercados, refiriéndose en realidad al sistema de precios relativos.

La idea sobre el equilibrio general es atribuible a Léon Walras (1874) quien en su aspiración por emparejar a la economía al nivel de ciencia natural impulsó la formalización matemática describiendo las interrelaciones sectoriales a través de ecuaciones simultáneas. En su esquema, la economía está constituida por hogares y firmas donde los recursos disponibles son utilizados en la producción y el consumo. La demanda de los hogares y empresas están en función de los precios existentes.

Bajo esta lógica, el precio de equilibrio es aquel que garantiza la igualdad entre oferta y demanda en todos los mercados y permite las asignaciones eficientes garantizado por la

⁸⁶ En contra parte, el método inductivo parte de la observación de la realidad para posteriormente comprender y construir los hechos teóricos detrás. En la visión de Bunge (2010) el uso del lenguaje ordinario y poco claro para expresar ideas hace incompatible la construcción de teoría económica con base en este método.

suma cero de las demandas y ofertas excedentes en cada sector. Si bien la base conceptual fue proveída por Walras, no fue hasta el trabajo de Arrow y Debreu (1954) donde se comprobó la existencia y estabilidad matemática del vector de precios que garantiza el equilibrio y demuestra los resultados óptimos de los mercados competitivos.

Así, la teoría del equilibrio general (TEG) representa la posibilidad de garantizar el funcionamiento adecuado, en términos de producción, ingreso y consumo, de una economía descentralizada. Este esquema concilia el progreso económico y la libertad plena del ser humano a través de la búsqueda del interés propio, es decir, la noción de un sistema social movido por acciones independientes en busca de un estado de equilibrio previsto es la contribución intelectual más importante que la economía ha hecho para la comprensión del proceso social (Arrow y Hahn, 1991).

A partir de la TEG, se ha desarrollado dos grandes métodos empíricos para describir el funcionamiento macroeconómico de los países: el Equilibrio General Computable (EGC) y el Equilibrio General Dinámico Estocástico (EGDE). Estos métodos prevalecen en los análisis de impacto en distintas temáticas.

5.1.1.1 Equilibrio general computable

La modelización económica está fuertemente vinculada con el marco conceptual de cada teoría. En el caso de la TEG, los modelos de EGC representan las principales características para derivar una explicación plausible del fenómeno investigado bajo las premisas de la economía neoclásica. De acuerdo con Grabbner (2014), el primer antecedente se ubica en Hebert Scarf quien fue el primero en desarrollar un algoritmo que permitió el cálculo numérico de los equilibrios Arrow-Debreu.

El EGC es considerada una herramienta que permite modelar a la economía haciendo uso de un sistema de ecuaciones simultáneas. Expresa la totalidad de la economía gracias a la creación de una red completa de interacciones sectoriales. Estudiar el equilibrio permite conocer las características de cada sector y la naturaleza del movimiento oscilante al equilibrio (Raghavendra y Piironen, 2023).

La descripción de la economía es a través del todo resultado de la suma de interacciones de sus partes. El término computable proviene de la capacidad para cuantificar los impactos que sufre una economía por la variación de alguna de las variables y obtener los resultados a través de una computadora, mientras el carácter de general significa que el modelo abarca toda la actividad económica de una economía simultáneamente, incluida la producción, el consumo, el empleo, los impuestos y el ahorro, y el comercio, y los vínculos entre ellos (Burfisher, 2016).

Las ecuaciones de comportamiento se basan principalmente en la teoría económica y por ende conservan los postulados neoclásicos. Se asume empresas y hogares maximizadoras de ganancias y de utilidad respectivamente sujetos a una restricción presupuestaria. Se produce un bien que se consume en la totalidad de la economía con base en la mejor tecnología disponible para todas las empresas. Las cantidades y precios de toda la economía son pactados en un solo momento. Con base en Parris (2016) y Grabner (2014), la mayoría de los ejercicios que usan EGC asumen lo siguiente:

- Homogeneidad de agentes
- Competencia perfecta
- Información completa
- Único equilibrio
- Racionalidad perfecta
- Empresas tomadoras de precio
- Ausencia del dinero, se toma un precio relativo
- Distribución factorial capital y trabajo de acuerdo con su participación

Después de la definición del modelo, se recurre a la calibración de los parámetros y las variables sometidas al análisis empírico. Con la información recabada, se procede computacionalmente a la resolución del equilibrio. A partir de los resultados, se realizan los ejercicios de estática comparada para evaluar los cambios y trayectorias de las variables

frente a choques exógenos. La especificación y calibración del modelo permite al experimentador controlar y replicar las variaciones exógenas y recalcular los equilibrios.

Debido a la sencillez analítica para modelar las interrelaciones dentro de la economía, el EGC ha ganado espacio entre los análisis académicos y los hacedores de política, principalmente el gobierno (Burfisher, 2016). Además, la disponibilidad de datos disponibles en las cuentas nacionales facilita la descripción de las actividades económicas (Wei y Aaheim, 2023).

5.1.1.2 Equilibrio general dinámico estocástico

Una de las principales críticas al EGC, más adelante se hará un balance profundo, es la falta de microfundamentos en el establecimiento de las relaciones causales. Si bien se plantean funciones agregadas bajo los supuestos neoclásicos, existen vacíos en relación con el comportamiento de los hogares y las empresas.

Desde la postura macroeconómica, los modelos del tipo EGDE permiten integrar al esquema de familias y empresas un bloque de política monetaria. En efecto, utilizan la teoría macroeconómica moderna, principalmente los aportes del nuevo consenso macroeconómico, para explicar y predecir los movimientos de series temporales agregada a lo largo del tiempo (Del Negro, 2012).

Estos modelos se consideran microfundamentados porque los agentes económicos poseen reglas de decisión paramétricamente determinadas (es decir, por sus preferencias, dotaciones iniciales y tecnología), además de incorporar el papel de la política monetaria y fiscal en forma de una optimización dinámica. Durante los años 70's Robert Lucas apuntó que los cambios de política cambiarían la forma en que la gente se comportaba y, por lo tanto, la estructura que se modelaba no era válida para el análisis de política (Hamill y Gilbert, 2015). Por lo cual, integrar la microeconomía a la macroeconomía dio como resultado estos modelos.

Un aspecto clave para modelos de EGDE es el uso del agente representativo para evitar los problemas de agregación. Asimismo, el cuadro de preferencias se construye bajo la idea de expectativas racionales, que implica el conocimiento perfecto del verdadero modelo subyacente de la economía por parte de los agentes, el uso eficiente de la información y la resolución de problemas sin cometer errores (Fagiolo y Roventini, 2012).

5.1.1.3 Límites y deficiencias del enfoque de los modelos de EGC y EGDE

La teoría neoclásica y la TEG se enfrentan a diversas controversias respecto a su fundamento analítico. Particularmente, no es posible garantizar la unicidad y estabilidad del equilibrio que garantiza la asignación eficiente en todos los mercados. En efecto, de acuerdo con el teorema Sonnenschein-Mantel-Debreu se demostró que no es posible la convergencia hacia el equilibrio debido a que el proceso de formación de precios requiere que la pendiente de demanda sea negativa, sin embargo, este resultado no se garantiza. La dinámica de las funciones de demanda a nivel individual no es la misma a nivel agregado (Ackerman, 2004).

Entre las principales deficiencias argumentativas en la TEG se encuentra la ausencia del dinero debido a que se hace referencia a una economía de trueque basada en precios relativos (una mercancía funge como dinerario), inconsistencias en el proceso de ajuste frente a excesos de oferta y demanda, pues no hay mecanismo endógeno que determine el punto de ajuste de las demandas excedentes. Por consecuencia, el proceso de arreglo requiere una entidad reguladora llamada “subastador walrasiano”. Esta figura va contra el espíritu de sociedades descentralizadas (Nadal, 2019). Además, en el afán de corroborar la eficiencia de los mercados, cualquier intervención gubernamental se plantea como un elemento de choque exógena que modifica el nivel de equilibrio y produciendo un resultado menos eficiente.

Estos límites se reflejan en la representación abstracta de los modelos EGC y EGDE. En efecto, la metodología detrás de estos modelos se recurre al individualismo metodológico para garantizar la estabilidad del equilibrio. No obstante, frente a choques exógenos, el cambio de parámetros afecta de manera diferenciada a los agentes, por lo cual, es bastante limitado comprender un efecto sincronizado y de la misma cuantía en los procesos de ajuste

y experimentación que posibilita la estática comparativa. Por consecuencia, las implicaciones económicas y políticas desde el EGC y EDGE producen reglas de decisión genéricas para todos los agentes por igual (Fagiolo y Roventini, 2012)

Además del problema de homogeneidad de agentes, la racionalidad perfecta supone la respuesta adecuada de los agentes haciendo uso de su capacidad cognitiva y la comprensión de la información en su conjunto. Eventos como la crisis financiera del 2008 demostró la gran debilidad de estos modelos cuya dinámica de convergencia basada en el funcionamiento perfecto de los agentes desechaban la posibilidad de crisis. La simplicidad del modelaje, la falta de pronóstico certero y el optimismo por ciclos económicos sin restricciones le trajeron crecientes críticos al conjunto de modelos (Napoletano *et al.*, 2012)

5.2 Modelos Basados en Agentes: una alternativa

5.2.1 Naturaleza del modelado basado en agentes

Ante la importancia de replantear los instrumentos analíticos, los Modelos Basados en Agentes (MBA) aparecen como una tercera vía frente a la dicotomía deductiva e inductiva. En efecto, el desarrollo de la programación y software informático ha inducido hacia la consolidación de un enfoque que intenta, recrear y describir, de manera computacional, ciertas situaciones del mundo real a través de simulaciones y estudiar cuantitativamente sus consecuencias.

Figura 5.1. Diferencias pensamiento deductivo, inductivo y MBA



Fuente: elaboración propia

La metodología general de MBA permite construir sociedades artificiales con el fin de facilitar a las ciencias, incluidas las sociales, el análisis y estudio de los distintos elementos que conforman los comportamientos colectivos. Su implementación requiere de relaciones informáticas y matemáticas para crear los mecanismos que subyacen a las regularidades en de los fenómenos sociales, yendo más allá de la conjetura walrasiana que asume una tendencia hacia el equilibrio gracias a las decisiones individuales (Amblard, 2010).

El primer MBA se remonta al trabajo de Orcutt (1957) quien desarrolló el primer ejercicio para el análisis de relaciones agregadas a partir de unidades heterogéneas. Esta primera generación de trabajos modeló los impactos de política a partir de la microfundamentación y el análisis de datos, sin embargo, no eran capaces de explicar las interacciones entre los agentes (Hamill y Gilbert, 2015).

Posteriormente, en los años 90's, gracias al desarrollo computacional surgieron una serie de modelos de agentes heterogéneos para identificar la evolución de las interacciones, los cambios entre los actores y la aparición de fenómenos emergentes. El trabajo seminal es de Epstein y Axtell (1996) con su modelo Sugarscape donde la distribución aleatoria de agentes a partir de la cantidad de azúcar en el plano generó fenómenos emergentes para la comprensión de la distribución del ingreso, pobreza y escasez.

En el cuadro 5.1 se muestra la diversidad de conceptualizaciones sobre el modelaje basado en agentes. Destaca palabras claves en común que hacen referencia a la implementación computacional. En gran medida el desarrollo de este modelaje se debe al crecimiento de software y algoritmos para construir economías computacionales con dinámica no lineales.

Cuadro 5.1 Algunas definiciones de MBA

<i>Autores</i>	<i>Definición</i>
Van Dam (2013)	Representación en software para estudiar el funcionamiento y comportamiento de estructuras complejas que resulta de interacciones reales entre usuarios para mejorar la toma de decisiones.

Van Dinther (2006)	Sirve para expresar preposiciones teóricas en modelos computacionales a partir de comportamientos heterogéneos con agentes de racionalidad limitada, interacciones dinámicas.
Tesfatsion (2006)	Permite analizar un sistema complejo adaptativo que se compone de unidades que interactúan, unidades reactivas dirigidas a objetos y hacia la realización de objetivos. Integra los efectos de unidades planificadoras.
Billari (2006)	Metodología donde se simulan actores autónomos sujetos a reglas de comportamiento y verifican si estas reglas basadas en micro pueden explicar regularidades macroscópicas.
Miess y Hommes (2023)	Los MBA macroeconómicos explican la evolución de una economía simulando el comportamiento a nivel micro de agentes individuales heterogéneos para proporcionar una imagen a nivel macro.
Foramitti (2023)	Base teórica y computacional para simulaciones basadas en agentes de individuos heterogéneos que intentan aumentar su calidad de vida a través de la satisfacción de las necesidades humanas con base en la investigación psicológica, las necesidades humanas se describen como saciables, adaptativas e interdependientes con el entorno social y biofísico.
Silverman (2018)	Desarrollo de algoritmos y reglas simples que pueden describir elementos del comportamiento social de abajo hacia arriba (de lo micro a lo macro).
Hamill y Gilbert (2015)	Es un programa de computadora que crea un mundo artificial de agentes heterogéneos y permite investigar cómo las interacciones entre estos agentes, y entre agentes y otros factores como el tiempo y el espacio, se suman para formar los patrones vistos en el mundo real.
Helbing (2012)	Esquemas ideales para estudiar interdependencias entre actividades humanas y otras entidades. Permiten partir del poder descriptivo de la argumentación verbal y determinar las implicaciones de diferentes hipótesis. Desde esta perspectiva, la simulación por computadora puede proporcionar “un marco formal ordenado y un aparato explicativo.
Gallegati (2018)	Herramienta que permite validar hipótesis. la metodología surge “a partir de abajo hacia arriba”. Los parámetros individuales y su distribución se estiman y luego se evalúan para verificar si emergen regularidades agregadas cuando se toman en conjunto. validación empírica micro, meso y macro.
Chappin, Nikolic y Yorke-Smith (2020)	Simular acciones e interacciones de agentes autónomos heterogéneos que no necesitan información perfecta, racionalidad perfecta a fin de estudiar los efectos emergentes a nivel sistemático y su desempeño en el tiempo.

Fuente: elaboración propia

La lente epistemológica de las economías computacionales es de abajo hacia arriba. Es decir, en lugar de suponer reglas de comportamiento -como la racionalidad completa e información completa- se asume un comportamiento más natural de los agentes cuya

capacidad cognitiva es diferenciada, cuentan con capacidad de comprensión del entorno limitado y busca la solución de una función objetivo.

La diferencia ontológica destaca en la concepción de los fenómenos respecto a metodologías que asumen el equilibrio general. Los MBA se interesan por identificar los factores emergentes que surgen desde el nivel micro hacia el nivel macro, dejando claro que no es posible hablar de la totalidad de la economía considerándola como la suma de las partes. En consecuencia, el análisis de MBA es ideal para el estudio de sistemas complejos donde interactúan entidades heterogéneas y cuya causalidad no es lineal.

Otro aspecto identificable en las definiciones es la visualización de las relaciones sociales. La economía se abre al espacio social reconociendo la importancia del entorno biofísico y cultural para el desarrollo de las reglas de interacción. En lugar de reducir el comportamiento humano a un ejercicio de maximización, se reivindica un carácter de racionalidad limitada cuyo comportamiento es adaptativo y evolutivo.

A diferencia del marco epistemológico de los modelos de inspiración neoclásica, el MBA es adecuado para el análisis de sistemas abiertos y complejos. Al respecto, la heterogeneidad de los actores implica un conjunto de reglas particular que se adapta y se modifica a medida que se relaciona con el resto de los actores. Como resultado, las redes de comportamiento pueden crear respuestas creativas y emergentes autoorganizadas ó caóticas (Helbing, 2012). El conjunto bajo análisis rompe con la noción de equilibrio, esto es, a medida que incrementen las interrelaciones, emergerán patrones emergentes en varios caminos.

5.2.2 Anatomía de los Modelos Basados en Agentes

Las características de los MBA implican una diversidad de categorías y definiciones vinculadas entre sí. Para evitar que se convierta en un elemento diverso y confuso, es importante construir una taxonomía de acuerdo con la literatura. De esta forma, es posible contar con taxonomía general que permita entender la construcción de un MBA.

- *Agentes:* Se refiere a la entidad principal dentro de la economía computacional. Su comportamiento estará definido en función del objetivo del sistema. Cada agente posee un comportamiento particular definido como un estado mental. Los agentes deben ser claramente identificable, son receptivos al cambio en el entorno, reciben información del sistema y del resto de agentes.
- *Estados:* Se trata de las propiedades de cada agente y se clasifica en dos. El estado interno, también llamada privado, se refiere al comportamiento cognitivo que depende únicamente del agente individual. Es decir, el comportamiento que no está sujeto a la interacción. El estado externo, público, se refiere a los patrones de comportamiento que dependen del entorno y la interacción. El comportamiento interno más externo resulta en el estado global.
- *Reglas de decisión:* Es la expresión concreta de los estados mentales. De acuerdo con los estados, los agentes ejecutan una acción específica. Específicamente, se trata de la regla de correspondencia que traduce estados en acciones. Su estructura depende de la composición de los actores. Si estuviese abordándose desde la economía neoclásica, la regla de decisión sería un caso específico (y no la generalidad) en donde se buscaría la solución óptima al conjunto de canastas de consumo disponibles sujeta a una restricción presupuestaria. Desde la economía evolutiva se discute si los actores aprenden por el path dependence, es decir, toman decisiones a partir del pasado, De manera computacional, las reglas de decisión pueden expresarse bajo la estructura *if, else, then*, también está la computación evolutiva donde los actores evalúan todas las soluciones posibles a su alcance y seleccionan la mejor de acuerdo con sus características. La formalización algorítmica permite representar la evolución de un sistema social en evolución (Amblard, 2010)
- *Acciones:* Es el resultado de las reglas de comportamiento. Por ejemplo, si la regla señala “si la inflación es mayor al 5 % durante 10 ciclos, entonces, deposita 10 mil unidades monetarias”, la acción sería la disposición de su ingreso en ahorro en determinadas unidades monetarias.

- *Entorno:* Contiene las características del medio donde interactúan los agentes. Puede tratarse de características territoriales, densidad de actores en una región, especificidades del entorno meso, entre otros.
- *Comportamiento:* Es el conjunto de acciones ejecutadas y los cambios en los estados. Uno de los intereses de los MBA es la aparición de comportamientos emergentes. Los cambios de estado a través de reglas se traducen en comportamientos, en muchas veces, resultado de las condiciones iniciales y en otras situaciones se trata de acciones que se encuentran fuera del comportamiento inicial. La fase de transición entre los estados de los agentes es el campo de análisis más importante en el estudio de MBA.
- *Información:* Es cualquier producto o insumo procesable por los actores proporcionado por el entorno. Se trata de todo aquello que necesita saber para ejecutar sus reglas y que no necesariamente es capaz de comprender.
- *Pasos:* La ejecución de las acciones en la economía computacional se establece a partir de steps. A diferencia del EGC donde todos los intercambios se ejecutan en un sólo momento del tiempo, en MBA se establecen horizonte de tiempo discretos medidos en pasos o momentos. Cada intervalo puede ser definido como un día, mes, año, de acuerdo con el planteamiento del problema.

5.2.3 Ventajas y límites de la modelación basada en agentes: simulación vs predicción

De forma general puede contrastarse las diferencias entre los métodos más importantes que corresponden a la economía neoclásica, la economía evolutiva, sistemas complejos adaptativos y bioeconomía. A la luz de las problemáticas que enfrenta la disciplina, parece que los MBA tiene la capacidad de simular situaciones más completas y plurales de fenómenos relacionados a una problemática específica. Sin embargo, su prematuro desarrollo presenta algunas desventajas algunas simplemente técnicas y otras por su naturaleza epistemológica:

- *Complejidad para la formalización del comportamiento de los agentes:* A medida que se vuelve más realista el modelo, las relaciones al interior comienzan a

dificultarse. Es importante establecer, dentro de la complejidad, los pasos, estados y reglas de manera clara sin tratar de capturar todos los fenómenos que involucra el espacio de interacciones. Es posible encontrar el orden al interior del caos.

- *Sofisticación del lenguaje de programación:* Al referirse de una economía computacional, la gran mayoría de economistas no están adiestrados para el dominio de lenguajes de programación.
- *Potencial computacional.* Mientras más elementos se integren en la simulación, las características del equipo computacional tendrán que ser elevadas. En muchos casos, pasar del nivel teórico al nivel práctica que implica la simulación se dificulta por el desconocimiento de la programación y la falta de recursos informáticos, principalmente, de Random Access Memory (memoria RAM).
- *Disponibilidad y calibración de datos:* Los ejercicios de MBA se pueden realizar de dos formas, alimentar el modelo con series de datos estadísticas de fuentes oficiales ó generar datos a partir de valores aleatorios. En el segundo caso, es importante utilizar un instrumento de calibración para identificar el nivel correcto de las variables para ejecutar las simulaciones. En caso de que los valores sean erróneos, la predicción podrá ser espuria y generará resultados inconsistentes. Una pequeña variación en las condiciones iniciales puede generar trayectorias diferentes entre sí. Para ello, se recomienda el uso simulaciones Montecarlo y el método de cadenas de Markov (Van Dintner, 2008).
- *Limites cognitivos del ejecutador:* Los seres humanos logramos analizar un espacio particular de nuestra realidad. Así que, por más que se intente capturar la totalidad de fenómenos en el modelo siempre habrá algún elemento relevante que escape. Para construir un modelo consistente, es clave tener una base teórica y conceptual sólida que permita delimitar el modelo.

Todo ejercicio de modelación en la economía tendrá límites específicos y espacios vacíos en su interpretación. La MBA tiende a comprenderse como un modelaje complejo y sofisticado que aleja a la mayoría de los científicos sociales. Incluso, en el debate académico se

caricaturiza refiriéndose que la totalidad de fenómenos afectan a todo en sí-mismo. No obstante, la estrategia empírica de MBA ilustra un caso divergente con la economía tradicional. Su principal ventaja es capturar simultáneamente los cambios que sufre el sistema frente a variaciones específicas.

La simulación tiene la ventaja de examinar las fases de cambio y la evolución de la estructura, mientras la predicción se concentra únicamente en el valor numérico. Gran parte de los problemas actuales giran en torno a la comprensión del cambio en las estructuras, entornos, actores y el mercado más no únicamente en la búsqueda de un valor específico cuya validez requiere de condiciones puntuales, mientras el resto de la economía bajo el principio de *ceteris paribus* se mantiene estática.

El cuadro 5.2 muestra una serie de categorías que representan las diferencias sustanciales entre los tres métodos y pueden considerarse ventajas de la metodología MBA. Como se ha señalado, la heterogeneidad de agentes y la racionalidad ilimitada son elementos que permiten el comportamiento emergente. Gracias a su capacidad cognitiva, el conocimiento es resultado del aprendizaje disponible en el entorno. Finalmente, la ventaja radica en la comprensión del sistema económico abierto en evolución gracias a la heterogeneidad de actores. Un sistema donde los agentes son homogéneos no tiene, por definición, la necesidad de evolucionar.

Cuadro 5.2 Comparativos entre EGC, EDGE y MBA

Propiedades	EGC	EDGE	MBA
<i>Agentes</i>	Homogéneos	Homogéneos	Heterogéneos
Comportamiento	Racionalidad completa	Racionalidad completa	Racionalidad limitada
Espacio analítico	Macro/sectorial	Micro-Macro	Meso-Micro-Macro
Tiempo	Continuo	Continuo	Discreto
Interacciones	Lineales	Lineales	No lineal
Conocimiento	Exógeno	Exógeno	Depende de las interacciones y la trayectoria
Información	Completa	Completa	Disponible
Dinámica	Equilibrio sin evolución	Equilibrio sin evolución	Homeostático-evolutivo
Sistema económico	Cerrado	Cerrado	Abierto
Enfoque	Predicción	Predicción	Simulación

Fuente: elaboración propia

5.2.4 Importancia de la validación empírica en los MBA

Si bien los MBA permite construir un horizonte diferente basado en la experimentación de la economía computacional con el fin de replicar un proceso de la manera más realista posible, es clave considerarse que los resultados obtenidos del conjunto de interacciones deben someterse a pruebas de consistencia. Así, la red de relaciones, procesos y resultados puede tomarse en consideración para el análisis dinámico y predictivo.

El aporte metodológico del modelado basado en agentes resulta innovador y vanguardista frente a las estrategias frecuentemente empleadas en el análisis económico. Como se ha señalado en el apartado previo, la metodología MBA busca ser una alternativa frente al análisis basado en relaciones causales lineales, interacciones simultáneas, comportamientos idénticos de los agentes y las mismas reglas de decisión.

A pesar de las ventajas, la forma de construcción los modelos de simulación son susceptibles a críticas por su naturaleza. Entre las controversias más frecuentes se alude a la falta de vínculo entre la dinámica del modelo y la evidencia empírica, la dificultad de comparar modelos similares por su nivel de especificidad (Guerini y Moneta, 2017), la falta de métodos de validación empírica de los resultados obtenidos y el grado de libertad de los supuestos bajo los cuales el experimentador construye el modelo (Fagiolo, *et al.* 2006).

La libertad de construcción del modelo puede conllevar a una sobre parametrización del comportamiento de los agentes, sumando variables innecesarias y consecuentemente su falta de poder explicativo en los resultados finales. Para ello, en la literatura especializada se debate fuertemente sobre los métodos para garantizar la validez de los resultados provenientes de la simulación.

Entre las principales pruebas destaca las pruebas destaca la calibración indirecta y el análisis de sensibilidad. El primer método se refiere a un procedimiento de calibración utilizando los valores en el rango cuya predicción sea compatible con los hechos estilizados. Este método también llamado Werker-Brenner prioriza los resultados de simulación para

cada conjunto de valores de parámetros del modelo para generar resultados coincidentes con la literatura y hallazgos empíricos (Moss, 2008)

El análisis de sensibilidad se enfoca en la variabilidad en los resultados de acuerdo con los parámetros del modelo. El plano ideal del modelador es aquel donde la variación de los parámetros no cause cambios drásticos en los resultados finales del modelo. De esta forma, los cambios en las condiciones iniciales reflejarán la solidez en la construcción de las interacciones internas. (Ten Broeke *et al.* 2016).

Estos autores aconsejan el método OFAT que consiste en la variación de cada parámetro de forma independiente mientras se conserva el resto fijos. La estrategia, denominada también univariada, requiere únicamente de inspección visual de los resultados (Fonoberova *et al.* 2013). Sumando al desarrollo de indicadores, Truong *et al.* (2014) proponen el índice de Jaccard, con el cual se evalúa la diferencia entre los valores obtenidos por la simulación y los valores reales.

La complejidad que incorporan los MBA conlleva también elementos para garantizar la solidez y consistencia de los resultados. Un modelo sólido debe cumplir con la capacidad replicativa (coincidencia de los datos generados con la evidencia empírica) y estructural, es decir, el modelo se comporta de acuerdo con las condiciones planteadas por el modelador (Arifin y Madey, 2015).

5.3. MBA y sus aplicaciones para la transición socioecológica

5.3.1 Importancia de una perspectiva compleja, evolutiva y bioeconomía de la transición a través de MBA

En el capítulo 2 de esta tesis se presentó un modelo teórico particular para analizar el proceso de transición. El Modelo Multinivel Bioevolutivo (MMB) es resultado de un proceso de microfundamentación de las relaciones a nivel micro, meso y macro. Debido a la naturaleza de sus marco ontológico y epistemológico, la metodología MBA es la estrategia adecuada para capturar las situaciones de cambio que ha presentado el sector eléctrico de México y

comprender las fases de transformación del sistema del sistema sociotécnico, integrando aspectos sociales, tecnológicos y sociales.

Al igual que en esta tesis, existe evidencia sobre la pertinencia del MBA para analizar la capacidad de largo plazo de los sistemas energéticos. De acuerdo con Chapin y Dijkema (2010), el sector energético puede comprenderse como un sistema socioeconómico de gran escala que implica múltiples relaciones. Sin embargo, los modelos de predicción se enfocan a una de las escalas, es decir, se concentran en los aspectos técnicos (la eficiencia de la producción energética), temas sociales (acceso a la energía) ó temas económicos (retorno de inversión). El uso de MBA permite integrar el comportamiento conjunto y simultáneo de los tres campos, en particular, la conducta del nicho, régimen y paisaje desde una perspectiva sociotécnica.

Cualquier sistema energético contiene una diversidad de empresas, tecnologías, acuerdos, tipos de empleos y sistemas de precios que coadyuvan con múltiples instituciones regulatorias bajo reglas de operación. Además, la instalación de complejos industriales generadores de energía se realiza en espacios geográficos específicos creando tensiones con los grupos sociales establecidos.

La diversidad de temas e interacciones dentro de un sistema complejo, como lo es el sector energético frente a la obligación de transitar a esquemas de menor impacto ambiental, vuelve importante vislumbrar los distintos escenarios que puede tomar la transición. Durante transiciones, la estructura y contenido de cada subsistema cambian a causa de las interconexiones entre agentes, reglas e instituciones que rigen el comportamiento de los actores.

El análisis requiere integrar la simultaneidad de fenómenos en un mismo modelo y en lugar de tener como referencia una situación de equilibrio a través de la estática comparativa, conviene estudiar las trayectorias de la transición desde las condiciones iniciales y la evolución de las interacciones.

En el caso del sector eléctrico, como se ha venido señalando en el transcurso de los capítulos precedentes, es una industria clave para el proceso de descarbonización de la economía. Su extensa vinculación con entidades institucionales, diseño de mercado, aspectos técnicos, disponibilidad energética, condiciones financieras e implicaciones territoriales exige un análisis multinivel basado en la descripción del MBA. Las diversas trayectorias que pueda tomar por la incorporación de energías renovables implican la evaluación de diversas políticas con diferentes negociaciones entre los actores, reconfiguraciones de la estructura productiva, beneficios, pérdidas y sobre todo un desempeño energético particular.

5.3.2 Algunas aplicaciones de MBA para analizar transiciones energéticas

La técnica de MBA se ha difundido para el análisis de diversas temáticas. En este apartado se muestran algunos casos implementados a la transición energética y sobre la difusión de energías renovables para conocer el planteamiento, operatividad, resultados e implicaciones del uso de MBA.

Una de las primeras grandes aplicaciones fue el desarrollo del Electricity Market Complex Adaptative System Model (EMCAS). La idea fue modelar un mercado eléctrico con el nivel de complejidad del mercado estadounidense (North *et al.* 2002). Los participantes del mercado son representados como actores poseedores de un conjunto de reglas y patrones de comportamientos. Los actores también pueden usar la información histórica (por ejemplo, el precio de la energía y la oferta de las empresas generadoras).

La simulación busca identificar las estrategias de las empresas generadoras de electricidad para la consolidación de un mercado eléctrico competitivo. También busca identificar las condiciones bajo las cuales las compañías tienen la facultad. Para ambos elementos, es importante analizar la evolución de los precios, las posibilidades de evolución del mercado y el potencial de nuevas empresas para ingresar (Maenhoudt y Deconinck, 2010).

Las empresas exploran nuevas estrategias de acuerdo con sus posibilidades técnicas comparando su desempeño con el periodo anterior. El modelo se compone de un espacio

multidimensional: capa de interacción, capa física, capa de negocios y capa de reguladores (Conzelmann *et al.* 2005). En conjunto, el EMCAS permite analizar el comportamiento heterogéneo con relación a la estructura física y

Otro modelo importante para simular la evolución del sector eléctrico es el Energy Modelling Laboratory (EMLab). Se trata de un modelo que describe el impacto de diversas políticas sobre el nivel de inversión en energías renovables en el sector eléctrico (Chappin *et al.* 2017). El EM-Lab representa un MBA cuyo objetivo principal es explorar los efectos a largo plazo de la interacción de las políticas energéticas y climáticas mediante un modelo de simulación de empresas eléctricas que invierten en capacidad de generación renovable para descarbonizar su producción (Chappin, 2013)

El modelo se compone de tres capas principales. En la primera, el engine layer se trata de la plataforma que contiene las líneas de comando que se refleja en una interfaz de interacción. En ella se construye los controles de simulación. La capa data layer permite al usuario seleccionar las configuraciones, es decir, definir las unidades de interacción, los datos y la política a ejecutar. La última capa, el agent layer, ejecuta las acciones descritas de la capa anterior y obtiene los resultados de la simulación.

Existen otros ejemplos utilizando MBA para la evolución del sistema eléctrico. En Pinto *et al.* (2014) se simula un entorno de simulación multi agente para la consolidación de un mercado eléctrico competitivo. El entorno permite construir escenarios donde existe una estructura centralizada y descentralizada como situaciones contrafactuales. Se evalúan ambos escenarios donde existe asimetría en la competencia y también contempla condiciones de complejidad donde los proveedores de energía interactúan sin una entidad regulatoria. Su particularidad radica en la construcción de un módulo que permite a los agentes adaptarse y analizar los contextos de negociación.

En el caso de Fatras *et al.* (2022) examina un MBA basado en la desregulación del mercado eléctrico. Se crea un ecosistema del mercado donde se representa el rol de los

participantes y su interacción entre sí. el objetivo principal es identificar las interrelaciones del mercado donde el consumidor puede participar a partir de su decisión de compra.

Un tema primordial es el análisis sobre las decisiones de inversión en energías renovables. Kraan *et al.* (2018) intentan replicar la dinámica del proceso de desregulación del mercado eléctrico. El fenómeno emergente que se busca clarificar es la toma de decisión de los inversionistas. El mercado eléctrico se caracteriza a las condiciones vigentes en la unión europea, asumiendo que los inversores se enfrentan a un mercado en evolución y comparan los distintos niveles de rentabilidad de acuerdo con cada trayectoria de transición. Los inversionistas poseen distintos niveles de aprendizaje de acuerdo con la tecnología que desean implementar.

Finalmente, al considerar una perspectiva socioambiental, el proceso de transición genera tensiones y problemas en las sociedades donde tienen lugar los nuevos proyectos de energía renovable. De Wildt *et al.* (2020) examinan los impactos sociales y los conflictos ambientales en sistemas eléctricos descentralizados. El objetivo es visibilizar e identificar quiénes son los afectados en el despliegue del sistema descentralizado.

Para el cumplimiento de su trabajo, construyen vecindarios heterogéneos con hogares de distinto nivel de ingreso. Cada hogar posee una serie de aspectos cualitativos que influyen en la aceptación de un nuevo proyecto energético: emociones, inseguridad, confianza, imaginación y conocimiento representan valores que limitan la adopción de nuevos esquemas de generación eléctrica. Los resultados concluyen que poblaciones de mayores ingresos optan por esquemas descentralizados para poseer control de la red, mientras los hogares de menores ingresos prefieren esquema descentralizados, aunque en términos financieros resulta costosa la administración de una red sin una entidad centralizada.

5.4 Una propuesta de simulación para el proceso de transición socioambiental del sector eléctrico mexicano

5.4.1 La transición socioambiental es un resultado emergente: descripción general de la modelación

Actualmente el sector eléctrico de México (SEM) se enfrenta a un proceso de cambio gradual para incorporar las tecnologías de generación renovable. En el capítulo 4 se analizó la evolución del sector en el largo plazo destacando los periodos de cambio sustancial. El Modelo Multinivel Bioevolutivo permitió desagregar los componentes a nivel meso, micro y macro que incidieron en el desenvolvimiento del SEM durante más de 100 años desde su nacimiento.

Durante la vigente administración federal, el SEM ha sido objeto de controversia. Mientras la reforma energética del 2013 continua en vigencia y estableció las condiciones para profundizar la participación de la iniciativa privada en la generación eléctrica, el ejecutivo impulsa la centralización de la generación en manos de la Comisión Federal de electricidad (CFE) y posicionar la gestión de la administración pública. Paralelamente, el crecimiento de la participación de las energías renovables ha sido tomado por el sector privado bajo las modalidades.

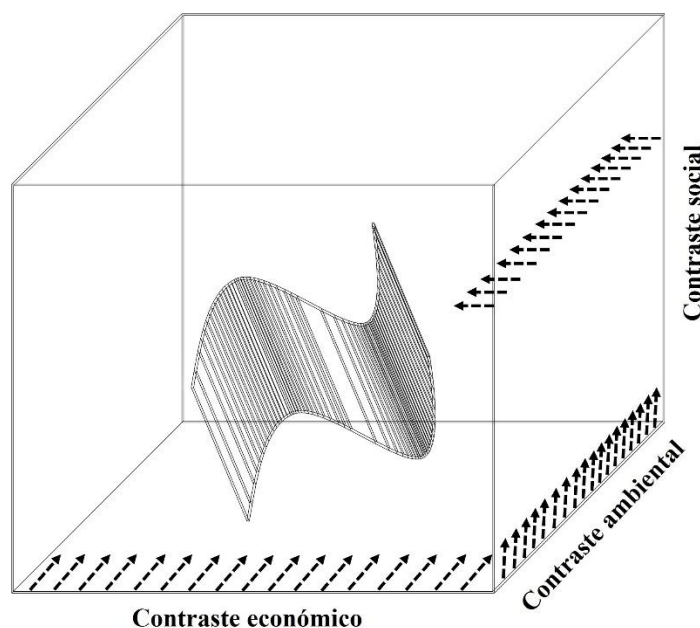
Un cambio fundamental en la estructura del mercado es la incorporación al esquema productivo de la generación eléctrica distribuida. Bajo esta modalidad, los productores destinan el total de la producción de energía eléctrica a pequeñas comunidades rurales o áreas aisladas que carezcan de la misma y que la utilicen para su autoconsumo, siempre que los interesados constituyan cooperativas de consumo, copropiedades, asociaciones o sociedades civiles, o celebren convenios de cooperación solidaria para dicho propósito y que los proyectos, en tales casos, no excedan de 1 MW (Ley de la Industria Eléctrica, 2022)

Frente a este escenario de cambio profundo del sector respecto a su trayectoria histórica, los ejercicios de simulación buscan establecer, en concordancia con el soporte

teórico del capítulo 2, la microfundamentación del Modelo Multinivel Bioevolutivo, las diferentes trayectorias de descarbonización que tendría el SEM.

Como se ha insistido en el transcurso de los capítulos, una perspectiva socioambiental de la transición permite capturar los componentes sociales, económicos y ambientales que implica el cambio de régimen energético. La figura 5. 2 muestra la manera en que las trayectorias simuladas permiten comparar en los tres espacios su desempeño en lugar de centrarse únicamente en el carácter tecnológico. Más adelante, se precisan las variables sobre las cuales se espera una incidencia diferenciada con relación a cada simulación.

Figura 5. 2. Interacciones desde una perspectiva socioambiental de la transición



Fuente: Modificado de BenDor y Scheffran (2018)

De forma general, el ejercicio de simulaciones a través de MBA busca construir un escenario para analizar las implicaciones de ciertas medidas para el desarrollo de energía eléctrica renovable en México. A pesar de los objetivos de reducción de emisiones de CO2 por parte del gobierno federal, no se ha planteado instrumentos ni mecanismos claros para lograrlos. Por ello, el objetivo de las simulaciones es presentar el impacto de instrumentos de

gobernanza energética en la generación de electricidad limpia, la evolución del precio de la energía y los niveles de emisiones de CO₂ y entropía.

Las hipótesis que se evalúan y que forma parte de los planteamientos generales de la tesis, enfatiza en dos aspectos. El primero hace referencia al papel de las políticas de gobernanza energética para el desarrollo de energía renovable. Gracias a la revisión del capítulo 3 respecto a la evolución de la producción energética limpia en 5 países a nivel internacional, fue posible identificar aquellos aspectos exitosos para el despliegue de la generación eléctrica renovable.

En particular, se analiza el papel del orden de mérito «merit order ». Este instrumento ha sido exitoso en países como Alemania para el incremento de la energía eléctrica a partir de fuentes limpias. Se trata de la determinación del precio de energía eléctrica durante una hora basado en el criterio del costo de producción más bajo. Por su naturaleza, la producción eólica y fotovoltaica son quienes menores costos de producción tienen. Así, el orden de mérito beneficia a las empresas más eficientes y son quienes inyectan en primer lugar su energía a la red, impulsando al resto de empresas a mejorar sus procesos productivos para mejorar su orden de despacho en el sistema eléctrico.

En segundo lugar, se analiza el instrumento tarifa de conexión «feed-in tariff». En países nórdicos y en Alemania, el gobierno estableció tarifas preferentes para los pequeños productores de energía limpia. Esta tarifa se trata de un pago directo por unidad eléctrica producida medida en MegaWatt (MW).

Así, la simulación de una tarifa FIT permitiría evaluar un caso hipotético en el SEM. Si bien se habla en la Ley Eléctrica de impulsar la generación distribuida, no hay ningún mecanismo para lograrlo. Esta simulación permitiría avanzar en la comprensión de dicho instrumento en el caso de México. Además, se visibilizaría una perspectiva integral de la transición donde las organizaciones y colectivos energéticos pueden participar en la generación eléctrica limpia, conducirá al incremento del nivel de generación eléctrica limpia para los hogares y empresas, minimizando simultáneamente el nivel de generación entrópica

vinculado al consumo energéticos y los conflictos ambientales a causa del despliegue de las nuevas inversiones.

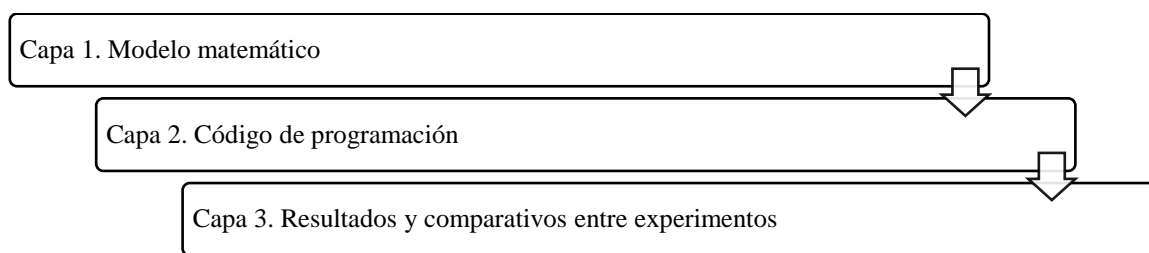
Los ejercicios de simulación pretenden comprar los tres escenarios de la transición, el esquema actual basado en la determinación del precio con base en las empresas más costosas basadas en carbón y petróleo, el impacto del orden de mérito y la implementación de la tarifa de conexión. El proceso de transición energética, es decir, el incremento de energía limpia por fósil será un resultado emergente que dependerá de las interacciones sistémicas tanto nivel meso, micro y macro que se presentan con detalle a continuación. Las simulaciones respetan la esencia teórica del capítulo 2 al tiempo que contempla una perspectiva socioambiental y económica pues considera lo que acontece con las grandes empresas, incorpora los pequeños esquemas productivos, analiza la evolución de los precios y producción eléctrica y evalúa el desempeño energético a través del nivel de emisiones de CO₂ y entropía.

5.4.2 Capas del modelo

El modelo general de simulación se integra de tres capas operativas. En la primera se describe el modelo matemático con bases en la metodología MBA que fundamenta las relaciones de interacción, la segunda capa se desarrolla el código de programación y en la tercera capa se ejecuta el proceso de simulación del modelo general y los experimentos. La figura 2 muestra las relaciones entre las 3 capas.

Como se presentó en el apartado previo, las diferentes construcciones de MBA siguen rutas divergentes. En el caso del modelo EMCAS y EMLab se tratan de modelos que ofrecen una capa donde el usuario no puede acceder a las líneas de programación ni al modelo detrás, simplemente ejecuta acciones cual si fuera una simulación interactiva. En el caso del modelo de este capítulo, la simulación no tiene el objetivo momentáneamente de construir una versión ejecutable donde el usuario compare las diferentes políticas. Los resultados de los experimentos serán simplemente para fines comparativos de los instrumentos implementados.

Figura 5.3. Capas del modelo para el análisis de la transición socioambiental como un fenómeno emergente



Fuente: elaboración propia

5.4.3 Descripción y características del modelo

El modelo de simulación tiene por objetivo demostrar que el proceso de transición socioambiental es un fenómeno emergente. Para la construcción lógica y congruente del modelo es importante distinguir ciertos puntos que permitan delimitar el alcance de la simulación

- *Problema de formulación e identificación del actor*

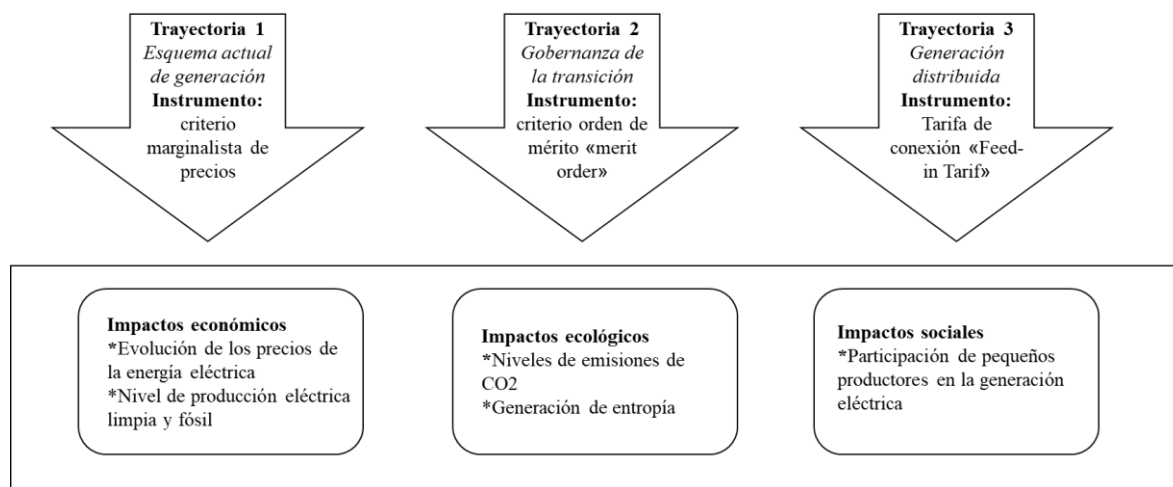
En la actualidad, existe un esquema de generación de electricidad vigente en el país donde convive la iniciativa privada y la empresa paraestatal CFE. El análisis detallado del capítulo 4 muestra una clara preferencia del sector público para centrarse en tecnologías basadas en combustibles fósiles, mientras el sector privado se interesa en tecnologías alternativas principalmente fotovoltaicas y eólicas. El actual diseño de mercado obliga a las empresas privadas a vender su electricidad a la CFE y ella se encarga de distribuirla a los usuarios finales.

Para evaluar la dinámica futura del SEM frente a los cambios organizacionales para incrementar la participación de las energías limpias, se simulan 3 trayectorias diferentes entre sí. El primer modelo considera la estructura actual de mercado y competencia en la generación eléctrica. Es decir, empresas privadas y CFE como únicos encargados de la generación eléctrica mientras la entidad pública tiene el control absoluto de la distribución.

El segundo modelo parte de la configuración actual de mercado y funcionamiento incorporando la gobernanza energética a través del orden de mérito. La tercera simulación consta de un escenario novedoso para el SEM y sus perspectivas hacia una transición socioecológica. Se simula un modelo de generación descentralizada, denominado en la normativa operativa como generación distribuida. En él, se analiza la evolución de la participación de energía eléctrica limpia con base en productores, ya sea organizaciones, comunidades o colectivos energéticos cuya generación no supere el 0.5 MW de generación.

Cada trayectoria se evaluará en tres dimensiones. La económica contempla i) nivel de producción eléctrica fósil y renovable, ii) evolución de los precios de la electricidad. En términos ambientales incluye: i) generación entrópica y ii) niveles de emisiones de CO2. Finalmente, bajo la consideración social se considera: i) el crecimiento de la energía limpia con base en la participación de comunidades energéticas. La figura 5.3 muestra claramente la distinción entre las trayectorias, los instrumento e impactos.

Figura 5.4. Experimentos de simulación y sus variables de impacto



Fuente: elaboración propia

La siguiente descripción del MBA corresponde a los principios establecidos en la microfundamentación del Modelo Multinivel Bioevolutivo descrito en el capítulo 2. Se busca

un nivel de concordancia entre el modelo teórico y la propuesta empírica. La descripción se basa en el protocolo ODD.

- *Tipo de modelo:* Evolución del mercado.
- *Objetivo:* Analizar el impacto de diferentes instrumentos de gobernanza (orden de mérito, tarifa de alimentación e inversión en investigación y desarrollo) en la evolución de la energía eléctrica renovable, las emisiones de CO₂ y la generación de entropía en México.
- *Identificación del sistema:* Sector eléctrico de México compuesto por una empresa pública (CFE) y empresas privadas bajo la forma de producción independiente de energía y autogeneración.
- *Agentes:* 1) Empresas del SEM están clasificadas por tecnología. Fósil: Carbón-Eléctrico (carbón), Ciclo combinado (gas natural), Combustión interna (diésel), Termoeléctrica (gas natural), Turbina de gas (gas natural), Cogeneración (gas natural). Renovable: Hidroeléctrica (agua), Eólica (eólica), Fotovoltaica (solar), Geotérmica (geotermia), Nuclear (uranio), Bioenergía (residuos naturales) La empresa paraestatal se caracteriza por el uso de tecnología de carbón e hidroeléctrica, mientras las empresas privadas están principalmente vinculadas a tecnologías solar y eólica. 2) Un regulador del mercado eléctrico CENACE. 3) Ubicación física (red eléctrica), 4) demanda eléctrica (comercial, público, doméstico, agrícola, transporte e industrial)
- *Estados:* Las empresas son entidades heterogéneas entre sí. Cada una de ellas tiene distintas condiciones productivas. Además, gracias a la capacidad cognitiva de los agentes modelado por el Homo Sapiens Œconomicus, las empresas son poseedoras de reglas y hábitos productivos. Cuentan con la habilidad de usar su conocimiento. Las empresas se distinguen por la forma en que determinan y pronostican los precios y producción. De forma aleatoria pueden estimar con base en la tendencia, media y el último dato.

- *Descripción de los instrumentos:* El orden de mérito y la tarifa de alimentación Feed-in Tariff son dos instrumentos para promover la producción de electricidad renovable. El orden de mérito es un criterio para determinar el precio de venta por hora. Según este criterio, los productores con el precio más barato, es decir, con los costos de producción más bajos, son los primeros en vender su producción. Este instrumento está a disposición de los grandes productores. *La tarifa de alimentación* es una tarifa fija que se paga por cada unidad de electricidad producida con tecnologías renovables. Este instrumento está a disposición de los pequeños productores.
- *Estados:* Las empresas eléctricas tienen dos variables de estado: producir (no producir) e innovar (no innovar). La CENACE tiene un estado respecto al precio: seguir el criterio marginalista o el orden de mérito.
- *Descripción del mercado:* Se trata de un mercado único. Toda la electricidad se produce y se vende en el mercado, es decir, no hay almacenamiento de electricidad. La demanda, la oferta y el precio por cada hora del día $t+1$ se determina en el día t . La demanda de electricidad es inelástica a los cambios de precios, pero la demanda es elástica a largo plazo. Cada año, la demanda cambia en un porcentaje fijo en relación con tres criterios: aumento de la población, aumento del producto interno bruto sectorial y aumento de la temperatura.
- *Reglas de decisión:* Debido a se enfrentan a un contexto particular de cambio climático, las políticas gubernamentales se esfuerzan por reducir el desempeño entrópico de la industria en su conjunto. A causa de la incertidumbre en cuanto a la nueva estructura del mercado eléctrico y las reglas de participación, las empresas se encuentran en desequilibrio. Hay algunas que han logrado adaptarse de manera pronta a los requisitos del nuevo mercado eléctrico y poseen ganancias mayores, mientras las empresas vinculadas a tecnologías tradicionales se enfrentan a procesos ineficientes y costosos, por ende, existen diferenciales de ganancias y pérdidas. El proceso de transformación del sector eléctrico de México sigue un patrón de destrucción creativa. El desplazamiento de las empresas vinculadas a tecnologías

fósiles obliga a reconfigurar los procesos productivos hacia la implementación de tecnologías renovables. Si las empresas desean mantenerse en el mercado deben recurrir a la innovación para seguir en el sistema de proveeduría eléctrica. Además, la brecha de ganancia entre empresas eléctricas con tecnología renovable y tecnología fósil incentiva a las empresas a innovar. Además, existe un diferencial de las ganancias. Aquellas empresas eficientes vinculadas a tecnologías renovables reciben beneficios extraordinarios.

- *Descripción de los métodos:* El objetivo de la simulación es analizar el cambio en el nivel de electricidad renovable. A lo largo del experimento, las empresas tienen la capacidad de determinar el nivel de oferta en relación con el precio determinado para el CENACE. Tienen 2 reglas de decisión. Además, las empresas tienen la oportunidad de invertir en investigación y desarrollo. Debido al orden de mérito, el precio de mercado beneficia a las empresas más eficientes. Por esta razón, las empresas tienen incentivos para aumentar la eficiencia de la producción con el fin de mejorar sus ingresos y su posición en el mercado. Tienen 2 reglas de decisión. Frente a las fluctuaciones del mercado, las empresas tienen dos formas de responder: creativa (inversión en investigación y desarrollo) y adaptativa (continuar con la misma forma de producción). En relación con los pequeños productores, son una estrategia: producir (no producir) frente a la implementación tarifa de conexión.
- *Comportamiento:* Frente al problema medioambiental y la posibilidad de incrementar ganancias son dos aspectos que influyen sobre la actualización de rutinas y reglas. Dado la calidad del contexto meso, las empresas tienen dos tipos de reacciones. i) Reacción adaptativa: Continúa con una estrategia que prioriza fuentes tradicionales de energía. Los recursos financieros son para dar mantenimiento a la capacidad instalada. Su capacidad micro limita su capacidad para absorber e internalizar los cambios del entorno meso y macro. ii) Reacción creativa: Poseen capacidades a nivel micro y son susceptible al entorno meso y macro. Se benefician de la experiencia

propia, competidores y derramas del conocimiento para desarrollar las nuevas tecnologías del sector y reducir el impacto ambiental de su actividad.

- *Entorno:* Las empresas están instaladas en el territorio nacional En México existen 9 zonas de despacho de electricidad con diferenciales en las tarifas de proveeduría.
- *Acciones:* Si las empresas tienen las capacidades micro para innovar, las empresas incrementarán su participación en la generación de energía renovable.
- *Información:* Precios, costos de producción, ingresos, nivel de producción, ventas pasadas, inversión inicial.
- *Temporalidad:* Hay dos temporalidades. Cada día se determina el nivel de oferta por hora, la demanda sectorial por hora, los costos de producción, el precio estimado por hora, el precio de mercado por hora y la decisión de producir o no. Cada año, se toma la decisión de innovar o no, a medida que la demanda evoluciona en relación con factores económicos y ambientales. Además, la red eléctrica cambia cada año.

5.5 Modelo matemático

La formalización matemática se desarrolla por etapas y por métodos. Las hipótesis de cada trayectoria se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 5.3 Hipótesis sobre las simulaciones sobre transición socioambiental del SEM

<i>Trayectoria 1. Continuidad del esquema actual de generación</i>	<i>Trayectoria 2. Segunda trayectoria. Gobernanza de la transición</i>	<i>Trayectoria 3. Trayectoria 3. Generación distribuida</i>
Los niveles de generación entrópica siguen incrementando al igual que la participación relativa de las energías renovables. En términos de emisiones de CO ₂ , no se cumple con las metas pactadas en los ODS. En materia socioambiental, se generan	Se espera una disminución relativa de la generación entrópica, aunque todavía no se alcanzan los niveles de emisiones de CO ₂ pactados por el gobierno. En términos económicos, incrementa el porcentaje de energía limpia y reducen los precios de la electricidad.	Disminución de generación entrópica y se alcanza el nivel de emisiones de CO ₂ compatibles con los ODS. En términos económicos, incrementa la producción eléctrica limpia y disminuyen los precios. En términos socioambientales, incrementa la participación

tensiones por conflictos asociados a nuevas inversiones.		ciudadana en la gestión y producción eléctrica mientras que respeta los límites naturales de su territorio.
--	--	---

Fuente: elaboración propia

5.5.1. Entorno de interacciones

Para el desarrollo del MBA, es importante establecer las condiciones de funcionamiento general del sistema, por lo cual, interesa delimitar el espacio de interacciones donde los diversos actores, reglas y normas interactúan. Cada empresa generadora de electricidad se ubica en un territorio específico y pertenece a una de las 9 regiones de distribución eléctrica: 1. Central, 2. Este, 3. Oeste, 4. Noreste, 5. Norte, 6. Noroeste, 7. Baja California, 8. Peninsular, 9. Baja California.

Considerar la territorialidad donde se desenvuelve el SEM por regiones específicas permite integrar dos aspectos claves en el desempeño de las empresas y evolución del tipo de energía eléctrica. En efecto, cada región del sistema interconectado tiene formas específicas para determinar el precio de venta de la electricidad⁸⁷ y cuentan con cierto nivel de infraestructura en líneas de transmisión. Ambos factores forman parte esencial en la expansión de las energías renovables.

5.5.2 Diagramas de flujo sobre las fases de la simulación

En el desarrollo de las simulaciones, es relevante establecer el orden de los procesos y la jerarquía de las relaciones. Por ello, en este apartado se describen los procesos de forma secuencial. En el anexo I y II se presentan los diagramas de flujo correspondientes a la simulación, así como el diagrama de clase necesario para la ejecución de las simulaciones

⁸⁷ La configuración del SEM establece dos tipos de precios de venta de la electricidad. Los precios marginales asignados en el mercado de día adelantado y los precios marginales del mercado en tiempo real. El primero se trata del precio asignado con un día de anticipación de acuerdo con la oferta de los productores y el pronóstico de demanda. El segundo, es el precio que surge frente a los picos de oferta y demanda en tiempo real. Por lo cual, el precio asignado en el mercado en tiempo real es la suma de las condiciones técnicas, las pérdidas y los costos de transmisión. En adelante, cuando se haga referencia al precio de venta de electricidad por parte de las empresas, se refiere al precio de mercado en tiempo real.

con la finalidad de determinar el número de elementos que interactúan entre sí. Se trata de la documentación necesaria para el buen desarrollo de la simulación. Asimismo, el código de programación está disponible en el anexo 3. En los tres modelos existe un ciclo similar de eventos, únicamente cambian los métodos.

La simulación comienza en el día t donde todos los sectores de la economía notifican a la CENACE sus demandas respectivas al día $t+1$. Con esa información, la CENACE advierte a los productores sobre la demanda por hora y por región de electricidad. Los productores de electricidad reciben esta información y debido a que son heterogéneos entre sí y poseen diferentes grados de racionalidad, pronostican su nivel de oferta y el posible precio de oferta bajo tres estrategias. Utilizan la tendencia, la media o el valor del día previo.

Posteriormente, la CENACE recibe los precios de oferta estimado por los productores y determina el precio de la electricidad para las 9 regiones de distribución durante cada 1 de las 24 horas del día. En este paso, en el modelo 1 bajo el criterio marginalista, el precio de la electricidad se asocia al productor más costoso, mientras en el modelo 2 utilizando el mérito de orden, la empresa con menor costo es la primera en ofrecer su electricidad durante cada hora.

Con los precios anunciados por CENACE, las empresas realizan un contraste entre su ingreso y los costos de producción. Si los precios reales de mercado les permite cubrir sus costos de generar electricidad, deciden producir. En caso contrario, no ofrecen electricidad durante esa hora. Debido a que el diferencial de ingresos es un incentivo endógeno en el sistema y los productores tienen la capacidad de aprender del entorno de negocios, las empresas pueden tener respuesta creativa y adaptativas tal como se mencionó previamente.

Aquellas empresas que no logran producir por tener un ingreso inferior al esperado pueden invertir en innovación y desarrollo (I+D) para mejorar su eficiencia técnica y reducir el costo de producción. Mientras, aquellas empresas que logran beneficiarse de los precios anunciados por CENACE y posean una respuesta creativa, pueden invertir en I+D para incrementar el nivel de capacidad instalada. En ambos casos, las empresas con respuestas

adaptativas se mantienen con la situación inicial. Finalmente, el proceso concluye con la estimación del nivel de producción eléctrica renovable, proveniente de fuentes fósiles, nivel de emisiones de CO2 y entropía antes y después de las reglas de decisión.

En el modelo 3, se incorpora el papel de la CENACE en la determinación de una cuota fija exclusiva para los pequeños productores de energía renovable. La regla de decisión indica que si el ingreso por unidad producida vía precios y tarifa de conexión es menor al gasto que incurrirían si compraran las mismas unidades de electricidad en el mercado mayorista entonces decide producir. Además, pueden evaluar si la Feed in Tariff es mayor a la inversión inicial con la finalidad de optar por incrementar la capacidad instalada o quedarse en el mismo nivel. Aquellos productores que no sea beneficiados por la existencia de la tarifa decidirán no incurrir en la inversión inicial para desarrollar un proyecto de generación descentralizada.

5.6 Detalle de los métodos

5.6.1 Pronóstico de la oferta

Los productores tienen 3 estrategias para predecir el nivel de oferta del día

*Algunos productores tienen en cuenta el promedio de las ofertas de los últimos tres días (Q_{t-2}, \dots, Q_t) para estimar la oferta de cada hora del día siguiente (\hat{Q}_{t+1}^1)

$$\hat{Q}_{t+1}^1 = \frac{\sum Q_{t-2} + Q_{t-1} + Q_t}{3}$$

*Algunos productores tienen en cuenta la tendencia de la oferta de la última semana (Q_{t-6}, \dots, Q_t) para estimar la oferta de cada hora del día siguiente (\hat{Q}_{t+1}^2)

$$\hat{Q}_{t+1}^2 = \alpha_i (Q_t \dots Q_{t-6}); \alpha_i = \text{tendencia de la oferta durante la semana } i$$

*Algunos productores tienen en cuenta el nivel actual de oferta para estimar la oferta para cada hora del día siguiente (\hat{Q}_{t+1}^3)

$$\hat{Q}_{t+1}^3 = Q_t$$

5.6.2 Pronóstico de los precios

Los productores tienen 3 estrategias para predecir el precio del día

*El productor tiene en cuenta el promedio de los precios de los últimos tres días (P_{t-2}, \dots, P_t) para determinar el precio de cada hora del día siguiente (\hat{P}_{t+1}^1)

$$\hat{P}_{t+1}^1 = \frac{\sum P_{t-2} + P_{t-1} + P_t}{3}$$

*Algunos productores tienen en cuenta la tendencia de los precios de la última semana (P_{t-6}, \dots, P_t) para estimar el precio de cada hora del día siguiente (\hat{P}_{t+1}^2)

$$\hat{P}_{t+1}^2 = \alpha_i (P_t \dots P_{t-6}) ; \alpha_i = \text{tendencia de los precios durante la semana } i$$

**Algunos productores tienen en cuenta el nivel de precios actual para estimar el precio para cada hora del día siguiente (\hat{P}_{t+1}^3)

$$\hat{P}_{t+1}^3 = P_t$$

5.6.3 Determinación del costo de producción e ingreso esperados

Costes de producción (C^*): precio del combustible* \hat{Q}_t^i + coste de las tasas de conexión a la red por región

Mientras los ingresos esperados es resultado de los precios estimados y la cantidad esperada

$$\widehat{R}_{t+i}^j = \widehat{P}_{t+i}^j \widehat{Q}_{t+i}^j ; j \in (1,3)$$

5.6.4 Formación del precio de la CENACE bajo el criterio marginalista

i) El CENACE ordena todas las ofertas por hora

(ii) El CENACE determina el precio al productor con los costos más altos por hora

iii) Determina el precio por hora y por día con base en los costos de las empresas de combustibles fósiles (patrón de producción actual en México). El precio corresponde a la base de datos oficial

$$P_t$$

5.6.5 Regla de decisión sobre producir o no

i) Las empresas determinan los ingresos reales en relación con el precio dado

$$P_t * \hat{Q}_{t+1}^j = R_t^j; \quad \text{Ingresos reales, } R_t^j: j \in (1,3)$$

(ii) Toma de decisión

Si $C^* < R_t$; produce (Q_p)

Si $C^* > R_t$ no produce

5.6.6 Determinación del precio final en el mercado y la oferta horaria

i) El precio final incluye el precio de la energía (basado en los costes de generación) P_e , el componente de pérdidas (π_i) y el componente de congestión (π_j) (determinado en la región de distribución por hora y por día)

$$P_e = P_t + \pi_i + \pi_j$$

ii) La oferta final por hora y por día es la suma de los productores que han decidido producir

$$Q_t = \sum_1^n Q_p; p \in [1... n]$$

5.6.7 Medición nivel de emisiones CO2 y nivel de entropía

El nivel de emisiones y la generación de entropía para cada tecnología y para cada hora son valores estimados para mí mismo en un capítulo de mi tesis con una metodología especializada. Teniendo en cuenta esto, para la simulación, existe un valor específico para cada unidad de electricidad producida. Para lo cual,

Emisiones CO2 = $\varphi * Q_t$; Parámetro de emisión de CO2 por unidad de electricidad φ :

Generación de entropía = $\kappa * Q_t$; Parámetro de entropía para la unidad de electricidad φ :

5.6.8 Decisión de invertir o no en I+D

Frente a la diferencia de ingresos entre empresas, particularmente a través de la determinación de precios bajo el criterio "orden de mérito", los productores tienen el incentivo de mejorar sus rutinas productivas porque el sistema de precios beneficia a las

empresas más eficientes (con los costos de producción más bajos). Es decir, luego de la determinación de los precios a nivel nacional por parte del CENACE, se producen dos respuestas entre ellos: *respuesta creativa* y *respuesta adaptativa*. Esta diferencia se refleja en la decisión anual de innovar o no.

Se determina aleatoriamente la cantidad de productores con respuesta creativa o adaptativa en la población

***Los productores que no producen** tienen dos reglas de decisión

- Con *respuesta adaptativa*, solo cambiando sus estrategias de predicción de precios (piensan que la diferencia en el ingreso es un problema con la determinación de precios, para lo cual el método pronóstico cambia, $\hat{P}_{t+1}^1, \hat{P}_{t+1}^2, \hat{P}_{t+1}^3$)
- Con la *respuesta creativa*, los productores tienen la oportunidad de gastar en investigación y desarrollo para **aumentar la eficiencia técnica** de la capacidad instalada actual
- **¿Qué nivel de eficiencia técnica es el objetivo?**
- $ET_{t+1} = ET_t + D_{t+1}$; ET_{t+1} : eficiencia técnica esperada, ET_t : eficiencia técnica actual; D_{t+1} : Previsión de la demanda anual.
- Este grupo de productores anticipa el aumento de la demanda anual teniendo en cuenta el aumento de *la población y la demanda sectorial*.
- Pronóstico de la demanda para el próximo año: $D_{t+1} = D_t + \Delta D_p + \Delta D_{PIB}$
 D_{t+1} : demanda del año siguiente; D_t : Demanda del año actual; ΔD_p : aumento de la demanda por incremento poblacional; ΔD_{PIB} : Aumento de la demanda por el crecimiento sectorial.
- El aumento de la eficiencia técnica es el resultado de la innovación a través del gasto en investigación y desarrollo.

$$\Delta ET = f(I + D)$$

$DI + D = I(i)$; Gasto en I+D; I : monto del préstamo equivalente a un porcentaje de la inversión inicial; i : tasa de interés anual

***Los productores que producen** tienen dos reglas de decisión

- Con la *respuesta adaptativa*, los productores prefieren mantener el nivel actual de capacidad instalada CI_t .
- Con la *respuesta creativa*, los productores tienen la oportunidad de gastar en I+D para aumentar la **capacidad instalada** y también considerando el aumento de la demanda anual al año siguiente.
- **¿Cuál es el nivel de capacidad instalada que se pretende?**
- $CI_{t+1} = CI_t + D_{t+1}$; CI_{t+1} : Capacidad instalada prevista; ET_t : capacidad instalada actual; D_{t+1} ::Previsión de la demanda anual
- Este grupo de productores prevé el aumento de la demanda anual teniendo en cuenta el aumento de *la población, la demanda sectorial y el aumento relacionado con el aumento de la temperatura.*
- Pronóstico de la demanda para el próximo año: $D_{t+1} = D_t + \Delta D_p + \Delta D_{PIB} + \Delta D_{TEM}$
- D_{t+1} : demanda del año siguiente; D_t : Demanda del año actual; ΔD_p : aumento de la demanda por incremento poblacional; ΔD_{PIB} : Aumento de la demanda por el crecimiento sectorial; ΔD_{TEM} : Aumento de la demanda por el incremento de temperatura.
- El aumento de la capacidad instalada es el resultado de la innovación a través del gasto en I+D.

$$\Delta CI = f(I + D)$$

$DI + D = I(i)$; Gasto en I+D; I : monto del préstamo equivalente a un porcentaje de la inversión inicial; i : tasa de interés anual.

5.6.9 Cálculo del orden de mérito

(i) La CENACE ordena todas las ofertas de menor a mayor precio

$\bar{P}_t = \begin{pmatrix} \hat{p}_1 \\ \vdots \\ \hat{p}_n \end{pmatrix}$; \bar{P}_t : vector de precios por hora; \bar{P}_t : precio menos caro; \hat{p}_n : precios más caro

$\bar{Q}_t = \begin{pmatrix} \hat{q}_1 \\ \vdots \\ \hat{q}_n \end{pmatrix}$; \bar{Q}_t : Vector de oferta horaria; \hat{q}_1 : oferta de la compañía más barata; \hat{q}_n : La oferta

de la empresa con el precio más alto

$\bar{D}_t = \begin{pmatrix} \hat{d}_0 \\ \vdots \\ \hat{d}_{23} \end{pmatrix}$; \bar{D}_t : demanda por hora; \hat{d}_0 : demanda de la primera hora del día; \hat{d}_{23} : demanda

de la última hora del día

(ii) La CENACE suma las ofertas hasta que sean iguales a la demanda horaria;

$$\hat{Q}_t = \sum \hat{q}_i + \hat{q}_{i+1} + \hat{q}_{i+2} + \dots + \hat{q}_{i+j} + \dots + \hat{q}_{n-1} + \hat{q}_n \text{ until } =; i \hat{q}_n \hat{q}_{i+j} \hat{d}_i \in [0..23]$$

Entonces $\bar{P}_t = \hat{p}_{i+j}$

iii) Los productores determinan el nivel de oferta e ingresos y deciden si producen o no

$$\hat{p}_{i+j} * \hat{Q}_t = R_{me} ; R_{me}: \text{Ingreso real con efecto de orden de mérito}$$

(ii) Toma de decisión

Si $C^* < R_{me}$; producto

Si $C^* > R_{me}$; no produce

5.6.10 Implementación de Feed-in Tariff

El CENACE determina la tarifa de conexión para estimular la producción de energía eléctrica renovable por parte de pequeños productores (menos de 0,5 MW). Se trata de un valor fijo por unidad de electricidad vendida ω que recibe el generador durante el periodo especificado

t

i) Cada productor define sus ingresos

$R_p = + p_i q_i \omega Q_t$; R_p : Ingreso del pequeño productor, p_i : precio por unidad de electricidad, q_i : cantidad generada en un día con relación a la capacidad instalada vigente; Q_t : cantidad de electricidad generada por día.

ii) Cada productor decide producir o no produce

Si $R_p > p_t Q_t$; $p_t Q_t$: Gasto de electricidad si se compra la misma cantidad en el mercado eléctrico nacional

Por lo tanto, *el productor genera*

iii) A partir de entonces, cada pequeño productor tiene la oportunidad de aumentar la capacidad instalada estimando los ingresos esperados durante cada año. Utilizan 2 reglas:

*Algunos de los productores consideran el monto de la inversión y el monto de la tarifa.

Sea $R_{e1} = \omega Q_t * 365$; R_{e1} : ingresos anuales estimados considerando la *Tarifa Feed* ω y la producción máxima con relación a la capacidad instalada actual.

Sea I : monto de inversión para aumentar la capacidad instalada al doble del nivel actual

Si $R_{e1} > I$, aumente la capacidad instalada

$R_{e1} < I$, mantener la capacidad instalada actual

* Algunos de los productores consideran la tasa de interés bancaria anual para financiar la nueva inversión y el monto de la tarifa y **también la duración.**

Sea $R_{e2} = (\omega Q_t * 365)t$; R_e : ingresos anuales estimados considerando la *Tarifa Feed* ω , la duración por años t y la producción máxima en relación con la capacidad instalada actual

Sea $I(i)$; i : la tasa de interés anual, el monto de la inversión para aumentar la capacidad instalada al doble del nivel actual

Si $R_{e2}/t > I(i)/t$, aumente la capacidad instalada

Si $R_{e2}/t < I(i)/t$, aumente la capacidad instalada

5.6.11 Parámetros

<p>Demanda sectorial:</p> <p>Sector Industrial: MW</p> <p>Sector Comercial: MW</p> <p>Sector agropecuario: MW</p> <p>Sector servicios: MW</p> <p>Sector agropecuario: MW</p> <p>Hogares: MW</p> <p>Criterios económicos y medioambientales</p> <p>Emisiones de CO2: Valor ya estimado</p> <p>Entropía: Valor ya estimado</p> <p>Previsión Δ PIB: % anual</p> <p>Temperatura anual: °C por zona</p> <p>Δ población: % anual</p> <p>Nivel de producción</p> <p>Nivel de generación de electricidad renovable: MW</p> <p>Nivel de producción de electricidad fósil: MW</p> <p>Tarifa FIT: \$*kWh</p>	<p>Tarifa FIT: \$/kWh</p> <p>Tipo de interés: porcentaje</p> <p>Gastos de investigación y desarrollo: \$</p>
<p>Criterios económicos y medioambientales</p> <p>Emisiones de CO2: Valor ya estimado</p> <p>Entropía: Valor ya estimado</p>	<p>Red de distribución eléctrica</p> <p>Líneas de transmisión: Kilómetros</p> <p>Regiones administrativas de distribución: 9 regiones (1. Central, 2. Oriental, 3. Occidental, 4. Noreste, 5. Norte, 6. Noroeste, 7. Baja California, 8. Peninsular, 9. Baja California)</p>
	<p>Entidad: Generadores de electricidad</p> <p>Parámetros:</p> <p>Tipo de tecnología fósil: Carbón-Eléctrico (carbón), Ciclo combinado (gas natural), Combustión interna (diésel), Termoeléctrica (gas natural), Turbina de gas (gas natural), Cogeneración (gas natural)</p> <p>Tipo de tecnología renovable: Hidroeléctrica (agua), Eólica (eólica), Fotovoltaica (solar), Geotérmica (geotermia), Nuclear (uranio), Bioenergía (residuos naturales)</p> <p>*Capacidad autorizada: Mega Watt (MW)</p> <p>* Producción máxima: MW * Eficiencia técnica</p> <p>* Eficiencia técnica: %</p> <p>*Precio del combustible = \$/petajola</p> <p>*Costos de la tarifa de conexión a la red = \$ / MWh</p> <p>*Costos de producción: \$</p>

5.7 Resultados de la simulación

5.7.1 Condiciones iniciales del modelo

La simulación se realizó en el lenguaje de programación Python-3 usando el compilador Anaconda-Jupyter Notebook. En particular, se utilizó la biblioteca Mesa⁸⁸, la cual fue

⁸⁸ Mesa se trata de una biblioteca desarrollada exclusivamente a la modelación basada en agentes. Debido a ser un ejercicio reciente, se encuentra en constante desarrollo y actualización. La versión de la documentación utilizada es la publicada el 2 de diciembre del 2023, aunque la última versión fue actualizada el 19 de marzo del 2024. Disponible en <https://readthedocs.org/projects/mesa/downloads/pdf/latest/>

desarrollada para la construcción y ejecución de modelos basados en agentes. El ejercicio de simulación se ejecutó durante 24 horas por 365 días, es decir, son 8760 pasos.⁸⁹

El proceso de simulación utiliza datos del año 2023. Las series de datos disponibles por el CENACE y la CRE se publican desde 2017, sin embargo, se optó por utilizar un año donde el sector tuviera un grado de mayor madurez y además los efectos de la pandemia hubieran estado fuertemente mitigados respecto a 2020 y 2021.

Como se describe en los diagramas de clase, se simulan tres escenarios del sector. El primero se asemeja a la estructura vigente, es decir, sin la presencia de algún instrumento de gobernanza para la determinación del precio y el impulso de la producción renovable. La segunda trayectoria integra el merit order y la tercera incorpora la feed-in tariff. Para la primera y segunda trayectoria se trabaja con la base de datos de grandes productores de electricidad nacional. En total se trata de 544 productores registrados ante la CENACE al mes de diciembre del 2023.

Respecto a la tercera trayectoria, se utiliza la base de datos de pequeños productores vinculados a la modalidad de generación distribuida. Como se apuntó en el capítulo 4, la producción de electricidad de productores cuya capacidad no es mayor a 0.5 GW se clasifican por tres modalidades de contraprestación: medición neta de energía, facturación neta y venta total de energía. Para esta simulación se utiliza únicamente a los productores bajo el esquema de venta total de energía correspondientes a 417 generadores.

La simulación tiene un supuesto respecto a la distribución territorial y la generación. Se trata de la imposibilidad de intercambio de energía entre las 9 regiones de generación eléctrica. En la realidad, el CENACE realiza la determinación del precio de la electricidad integrando tres elementos: precio de electricidad, costos de congestión y costo de transmisión. El primer elemento considera la oferta y demanda a nivel nacional por cada hora. Para el resto de los componentes se toman en cuenta la oferta y demanda a nivel de

⁸⁹ La ejecución de cada paso tardó aproximadamente 3-4 minutos dividiendo los periodos por mes para facilitar el ejercicio. Se utilizó un equipo portátil con 32 gigabits en memoria RAM y un procesador Intel i7-12800H.

nodo de conexión en cada zona. Por lo cual, si en cierta región existen zonas con excedentes de electricidad, tienen la capacidad de transferirla a zonas con déficit.

En las simulaciones se asumen que no existen intercambios de energía. Debido a la dificultad de realizar la determinación de precio a nivel de nodo de conexión se opta por un modelo simplificado a partir de la oferta y demanda agregada. Así, las series de tiempo para la determinación del precio que se utilizan es exclusivamente el componente de energía, el cual, es el mismo para todo el país pues considera la oferta y demanda a nivel nacional sin considerar el componente de congestión y transmisión.

Realizar un análisis con intercambios de electricidad entre zonas con superávit y déficit implicaría una elevada complejidad de programación y una gran utilización de recursos computacionales que superaría a cualquier equipo estándar. Se trataría del cálculo del precio en más de 2600 nodos de conexión para cada hora del día durante un año, alrededor de 23 millones de estimaciones.

Finalmente, el modelo integra la disponibilidad de las tecnologías renovables. En la simulación, la electricidad proveniente de tecnología fotovoltaica sólo se despacha en la red entre las 7 horas y 18 horas. El resto de las tecnologías, de acuerdo a los datos de CENACE, no tienen restricciones en la proveeduría de electricidad.

Los productores inician la simulación en el día cero y ejecutan los siguientes métodos durante cada hora del día:

- Predicción de oferta
- Predicción de precios
- Estimación de ingreso esperado
- Estimación de costos de producción

Después, la CENACE ejecuta sus procedimientos durante cada hora del día:

- Recopilación de las ofertas de cada productor

- Determinación del merit order (seleccionar el costo de producción eléctrica más bajo para cada hora)

Con la ejecución de los métodos de la CENACE, los productores continúan con la siguiente etapa de sus decisiones:

- Estimación del ingreso real
- Toma de decisión para producir
- Determinación de respuesta creativa y adaptativa

En este punto de la simulación, se obtiene las variaciones de los precios, el nivel de generación de ECO2 y el nivel de entropía.

Al final de los 365 días, aparece la demanda en la simulación. Los niveles cambian de acuerdo con los parámetros de crecimiento poblacional, incremento de la temperatura. Respecto a la red eléctrica, se trata únicamente de un espacio físico donde cada empresa está instalada. Finalmente, ante las variaciones de la demanda y el tipo de respuesta de cada productor, se ejecutan los últimos procedimientos:

- Determinación de la innovación
- Decisión incrementar eficacia técnica
- Decisión incrementar capacidad instalada

Con relación a la serie de precios, se utiliza los precios marginales de energía en operaciones de mercado adelantado sin considerar los componentes de pérdida y congestión. Por lo cual, las simulaciones se basan estrictamente sobre precios de energía vinculado a la eficiencia productiva de los productores

5.7.2. Diferencia entre criterio marginalista y orden de mérito

Esta simulación intenta integrar la discusión reciente en el SEM. El gobierno del presidente López Obrador ha intentado reformar de manera profunda la industria eléctrica para devolver a la CFE su rol preponderante asumiendo que este acto garantizará la soberanía energética.

A pesar de la negativa por parte de la Suprema Corte al proyecto de reforma por considerarla anticonstitucional y por contradecir los principios acordados en el T-MEC en materia de energía, el presidente recurrió a decretos para modificar la LIE en 2021.

Resulta importante traer a tema esta disputa política pues define la trayectoria de evolución del sector. En específico, interesa la modificación sobre las funciones del CENACE, artículo 108, apartado V en el cual dice “Determinar la asignación y el despacho de las Centrales Eléctricas, de la Demanda Controlable y de los programas de importación y exportación, a fin de satisfacer la demanda de energía eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional, y *mantener la Seguridad de Despacho, Confiabilidad, Calidad y Continuidad del Sistema Eléctrico Nacional*⁹⁰” (LIE, 2022).

En la modificación se agrega un punto vinculante entre la determinación de asignación y despacho de los productores respecto a la seguridad, confiabilidad, calidad y continuidad. Bajo esta idea, La CENACE abandona el criterio de eficiencia para determinar el precio por hora de la electricidad y deja un espacio subjetivo en el cual las ofertas de electricidad de la CFE puedan verse favorecidas, aunque no sea el productor más eficiente en términos de precios.

Así, el actual esquema de asignación de la demanda no garantiza que sea cubierta por el productor más eficiente. Por lo cual, esta primera trayectoria asume que el criterio de asignación de precios bajo el criterio marginalista, es decir, la oferta del productor menos eficiente que cubre la demanda determina el precio de la electricidad. Esta modalidad para la determinación del precio se denomina marginalista. Se trata de asignar el precio de la electricidad con base al generador más costoso tal que la demanda sea igual a la oferta.

Por otra parte, el orden de mérito se trata de una herramienta para la determinación del precio fundamentada en el principio del más eficiente. En ella, los generadores de energía

⁹⁰ La versión pasada era “Determinar la asignación y el despacho de las Centrales Eléctricas, de la Demanda Controlable y de los programas de importación y exportación, a fin de satisfacer la demanda de energía eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional.”

Cuadro 5.4 Costos de generación eléctrica (\$/MWh) y orden de proveeduría

Mes	Tecnología	Eólica	Foto-voltáica	Geo-térmica	Ciclo-combinado	Carbo-eléctrica	Nucleo-eléctrica	Turbina Hidráulica	Turbina de Gas	Combustión Interna
Enero	Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Costo	537.39	550.54	1228.23	1267.76	1391.53	1391.53	1399.20	5529.32	6569.28
Febrero	Orden	1	2	5	3	6	7	4	8	9
	Costo	564.79	578.61	1533.71	1371.56	1789.73	1789.73	1517.04	4009.49	9990.77
Marzo	Orden	1	2	4	5	6	7	3	8	9
	Costo	438.14	448.86	1313.40	1324.33	1459.47	1459.47	1108.48	6062.29	8376.00
Abril	Orden	1	2	5	4	6	7	3	8	9
	Costo	546.64	574.53	1361.12	1339.51	1550.80	1550.80	1134.55	3033.70	7061.12
Mayo	Orden	1	2	4	5	6	7	3	8	9
	Costo	575.18	604.53	1151.75	1219.46	1278.29	1278.29	1142.62	2786.36	6995.50
Junio	Orden	1	2	4	3	6	7	5	8	9
	Costo	571.18	595.72	1263.27	1217.55	1431.57	1431.57	1370.44	3168.72	12694.55
Julio	Orden	1	2	5	3	6	7	4	8	9
	Costo	545.55	565.85	1322.18	1171.82	1472.80	1472.80	1221.59	2982.56	8682.21
Agosto	Orden	1	2	4	7	5	6	3	8	9
	Costo	556.18	576.87	1001.97	1161.12	1096.98	1096.98	802.30	2572.41	5934.80
Septiembre	Orden	1	2	4	5	6	7	3	8	9
	Costo	522.98	542.44	1239.40	1240.17	1465.43	1465.43	841.95	3062.12	7381.89
Octubre	Orden	1	2	5	4	6	7	3	8	9
	Costo	518.33	537.61	1291.44	1186.33	1502.41	1502.41	991.56	2619.78	5316.71
Noviembre	Orden	1	2	5	4	6	7	3		
	Costo	464.53	481.81	1400.24	1336.53	1544.74	1544.74	1055.78	3120.63	6198.85
Diciembre	Orden	1	2	5	3	6	7	4	8	9
	Costo	431.57	447.63	1325.42	1117.39	1527.04	1527.04	1271.25	5844.17	6224.93

Fuente: Elaboración propia con datos de la CRE (2023)

renovable son los primeros en suministrar a la red eléctrica por el bajo costos de generación y finalizan los productores fósiles. Así, a medida que incrementa la generación de electricidad renovable mayor capacidad de cubrir la demanda y descienden los precios.

5.7.3 Costos de generación y demanda de electricidad

Las simulaciones toman en cuenta los costos por MWh de cada tecnología durante el 2022. El cuadro 5.4 muestra el costo mensual de la energía eléctrica y su orden de proveeduría. Durante todo el 2022 la tecnologías eólica y fotovoltaica son las más económicas y las primeras en vender su generación eléctrica, mientras las turbinas de gas y las plantas de combustión interna son las más costosas.

5.7.4 Evolución del precio bajo el criterio marginalista y orden de mérito

Las simulaciones integran la heterogeneidad de los productores. En la realidad, cada empresa utiliza estrategias diferenciadas para la determinación de la producción. Como se apuntó en apartados previos, un día antes a la venta de electricidad se estiman las ofertas y demandas esperadas. En el caso del modelo es posible realizar el ejercicio de predicción del precio y la cantidad ofrecida. Cada estrategia está vinculada a un nivel de probabilidad que fugue como parámetro. Al momento de realizar experimentación con los valores, no se encuentra incidencia de las estrategias sobre la determinación de los precios.

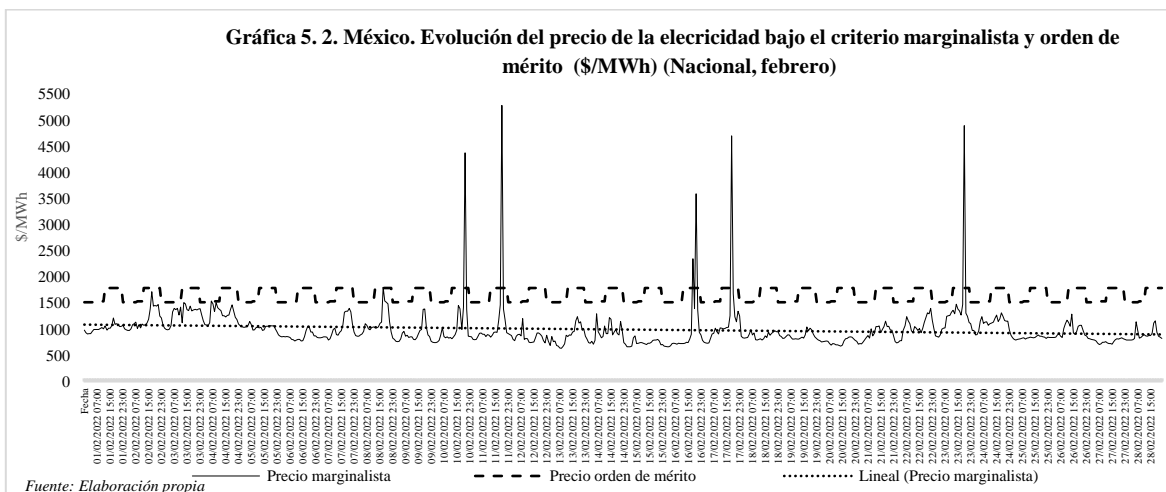
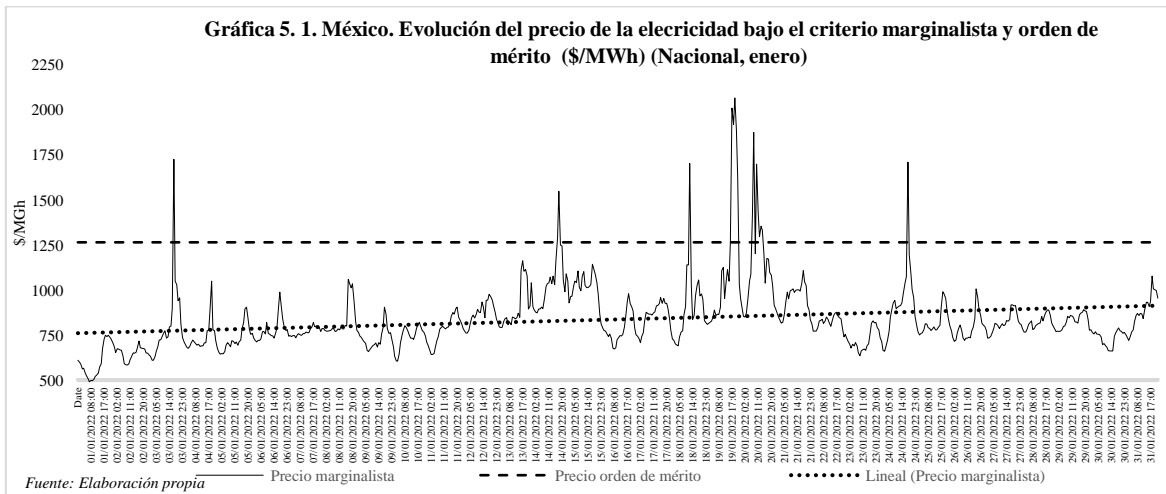
El conjunto de gráficas 5.1-5.12 muestran la evolución de los precios de la electricidad en las dos simulaciones. Existen diferencias profundas entre ambos mecanismos de asignación de precios, marginalista y orden de mérito. Durante todos los meses que se ejecutó la simulación, excepto abril, el orden de mérito muestra beneficios en términos de precio. En el restante de meses, el criterio de ordenamiento basado en los menores costos no garantiza una disminución del precio.

La simulación durante enero el precio calculado con el orden de mérito incrementa en 55.95% en promedio diario, 74.89%, 43.73%, 24.70%, 146.81%, 110.87%, 53.66%, 95.10%, 39%, 86.37% y 75.36% corresponde a los incrementos de los precios promedios de la electricidad durante febrero, marzo, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. El único mes que reportó disminuciones en promedio mensuales fue durante abril con un descenso del 7.79%.

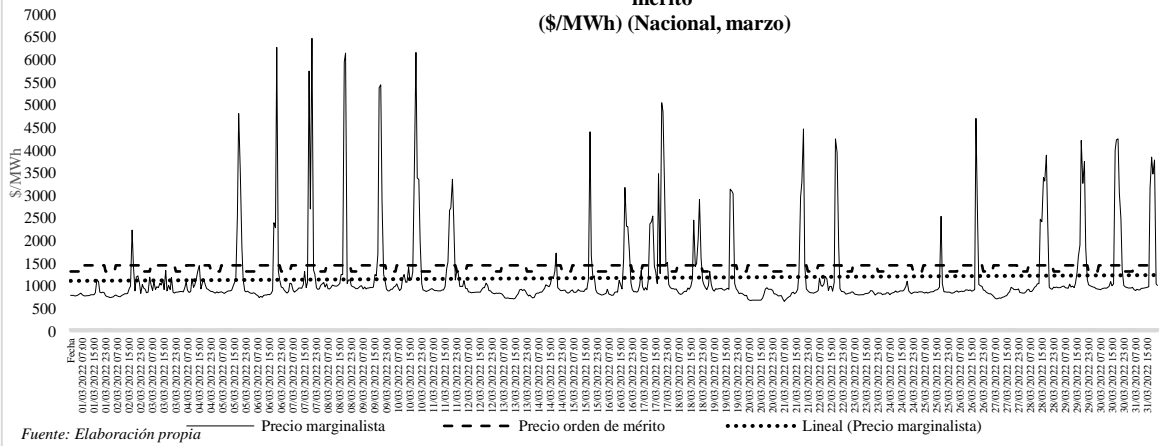
Existen al menos dos factores para explicar la dinámica de los precios. El primero corresponde a la falta de capacidad instalada y generación de energías limpias para cubrir la demanda nacional. De acuerdo con la simulación no existe la oferta de fuentes limpias equivalentes a la demanda, por lo cual, deben incorporarse a la proveduría el resto de las tecnologías provocando que la determinación del precio sea por parte de las tecnologías fósiles. En efecto, al acabarse la capacidad de generación por parte de las tecnologías

renovables, el resto de las tecnologías entran en la lista en el orden establecido en el cuadro 5.4.

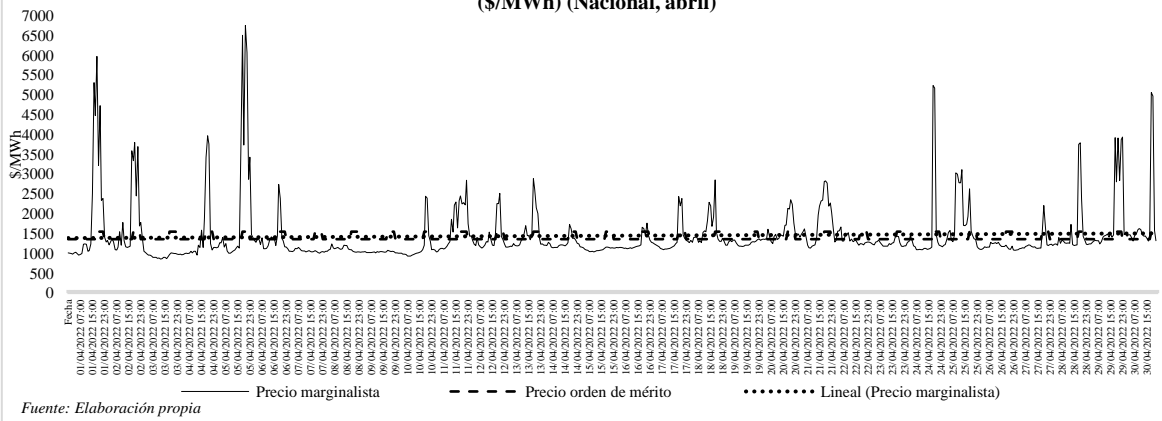
Por otra parte, un factor para explicar el diferencial de precios es la ausencia de intercambios de excedentes entre zonas productoras. Como se apuntó, la complejidad del modelo se elevaría extremadamente si se considera que los nodos de conexión determinarían la oferta, demanda y excedentes de generación. Asimismo, asumiendo un incremento de la capacidad de generación, el problema a la cual se enfrentaría la red es la falta de líneas de transmisión suficientes para distribuir el nuevo nivel de generación y evitar que el componente de congestión y transmisión se vuelvan parte del precio final.



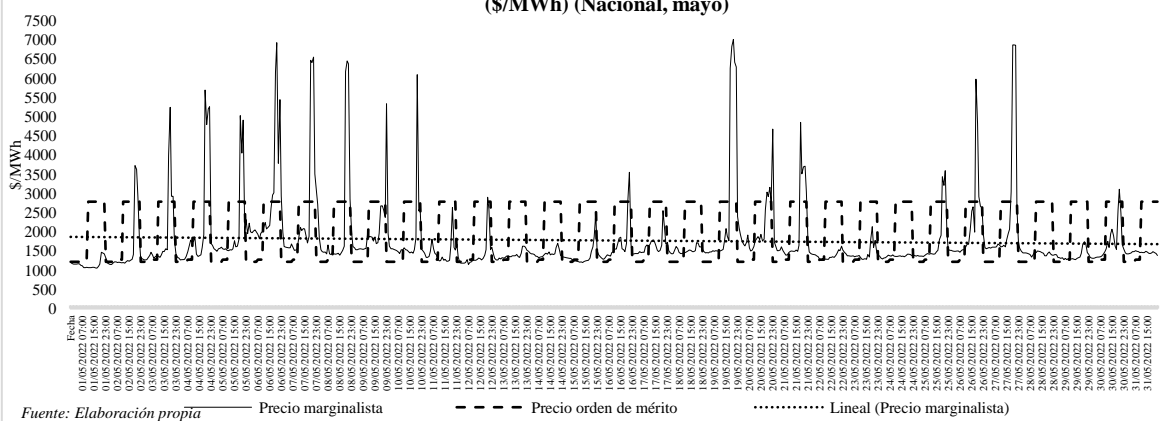
Gráfica 5. 3. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, marzo)



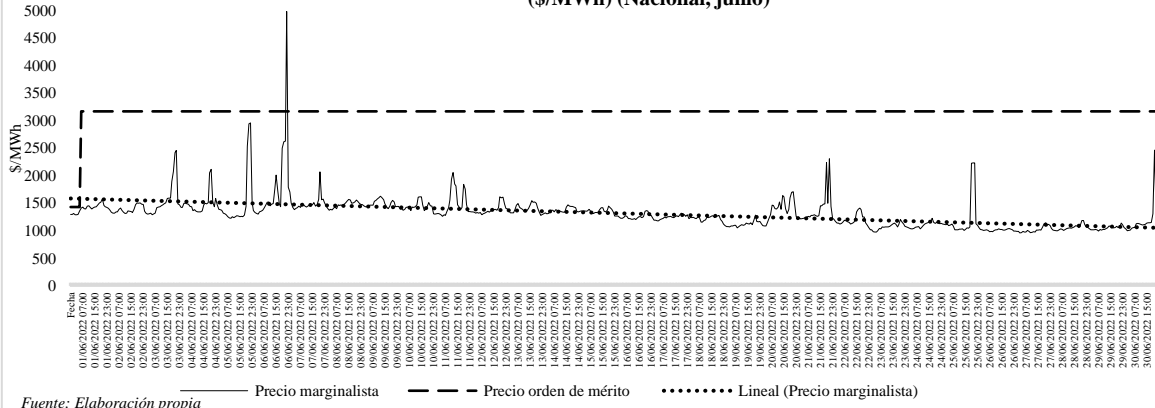
Gráfica 5. 4. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, abril)



Gráfica 5. 5. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, mayo)

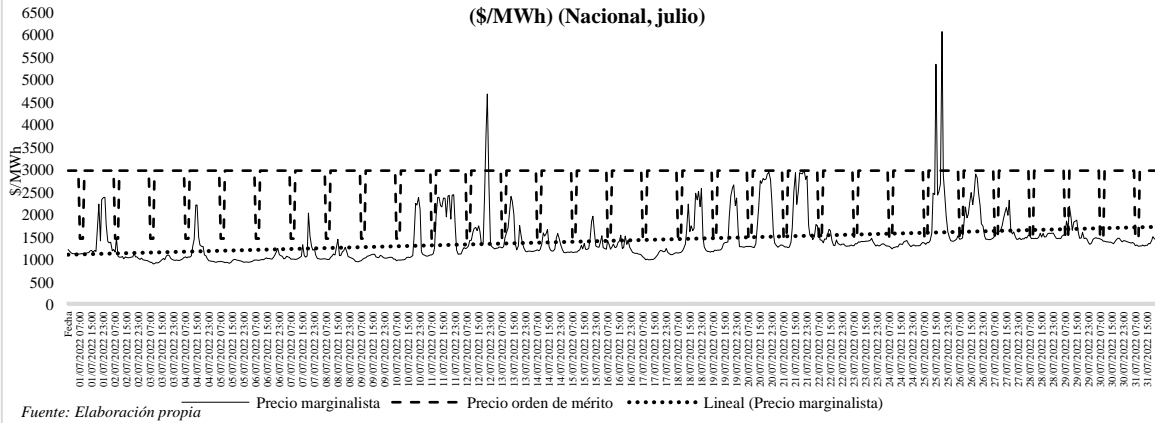


Gráfica 5. 6. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, junio)



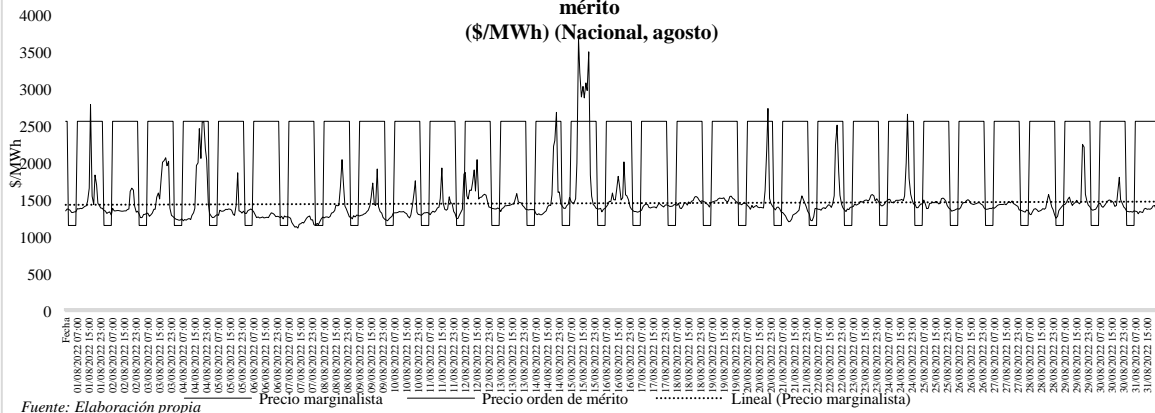
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5. 7. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, julio)



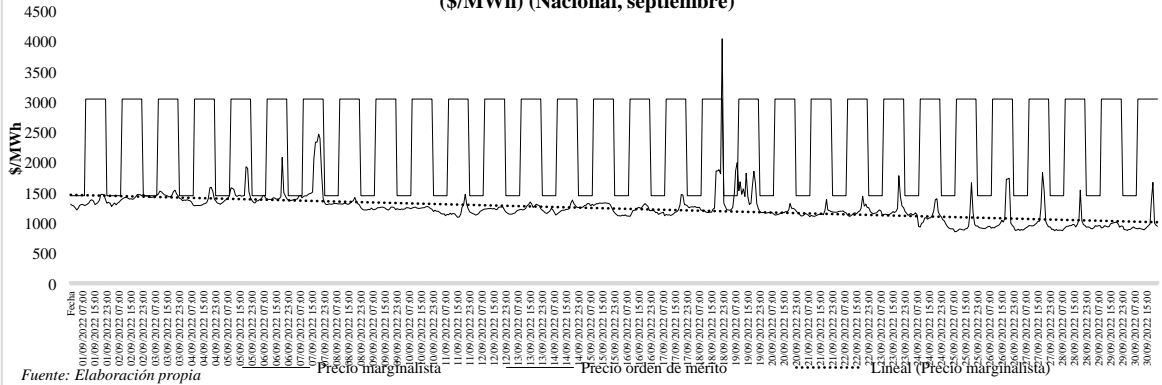
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5. 8. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, agosto)

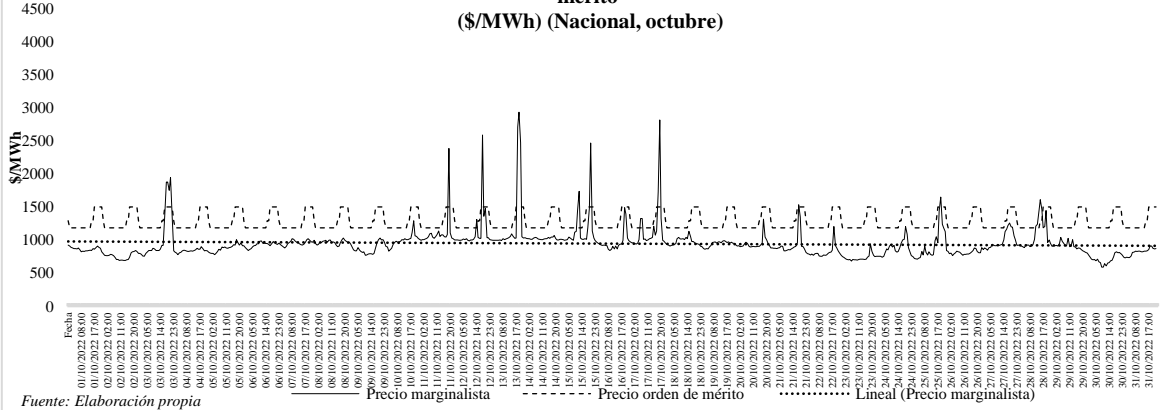


Fuente: Elaboración propia

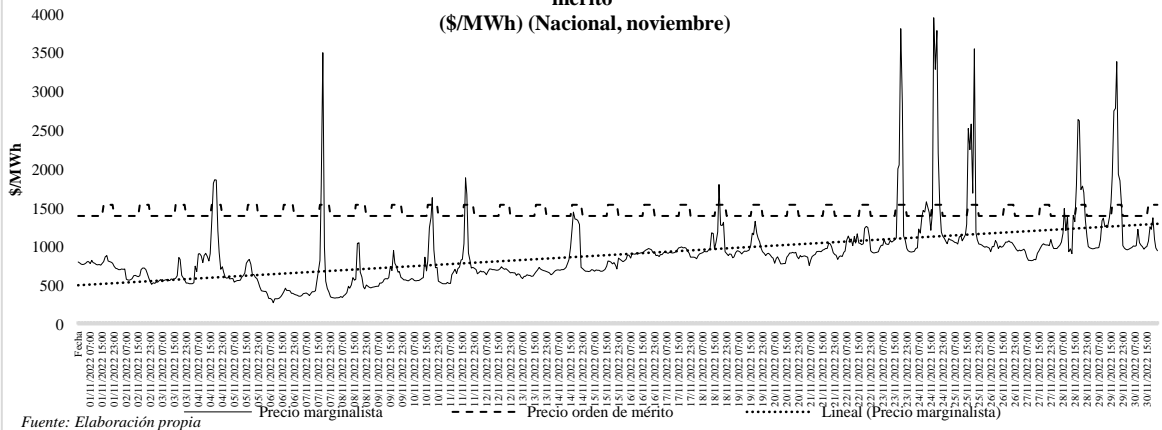
Gráfica 5. 9. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, septiembre)

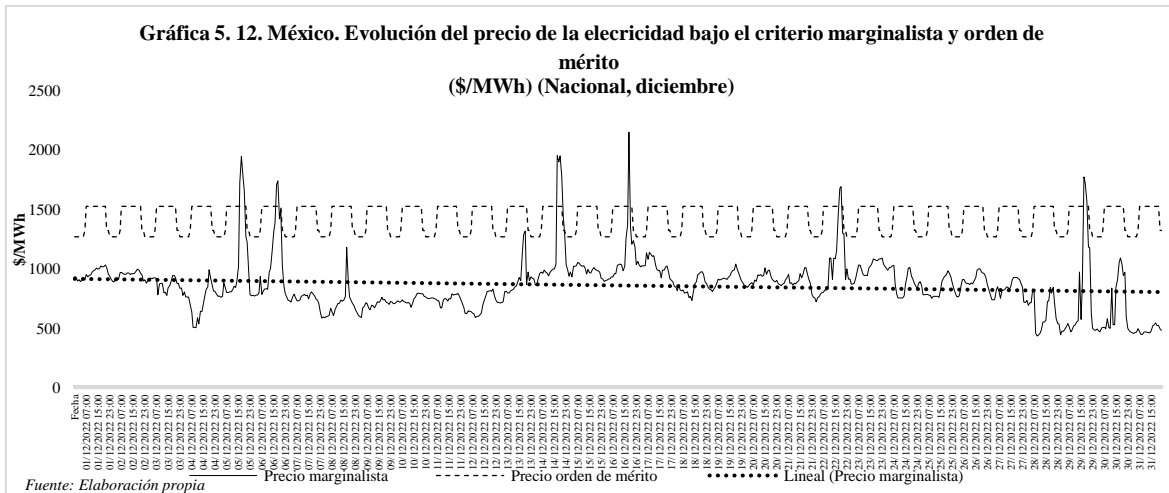


Gráfica 5. 10. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, octubre)



Gráfica 5. 11. México. Evolución del precio de la electricidad bajo el criterio marginalista y orden de mérito (\$/MWh) (Nacional, noviembre)





5.7.5 Evolución de las emisiones de CO2 y generación entrópica

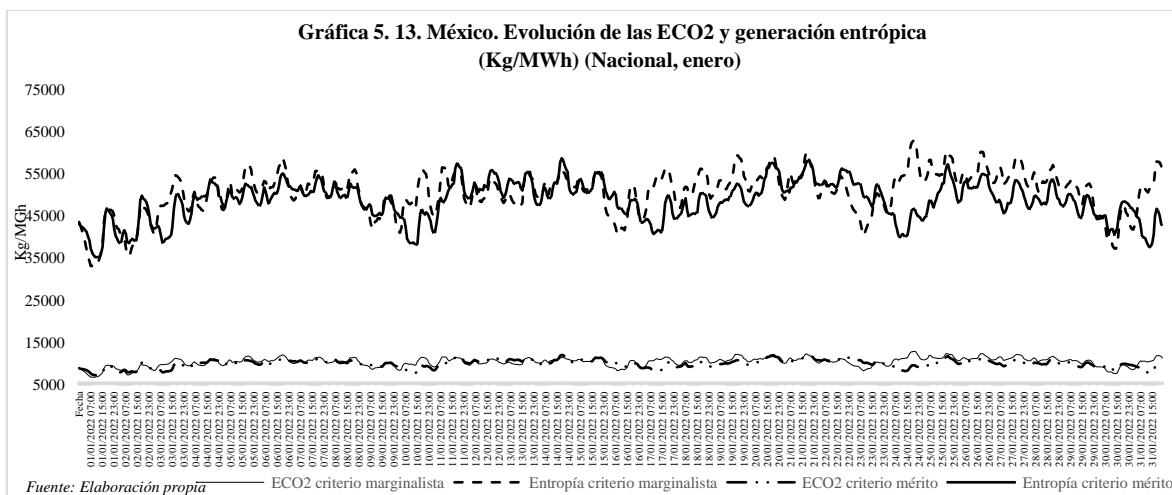
Un segundo elemento destacable dentro de las simulaciones es la generación de emisiones de CO2 y el factor de entropía. Como se apuntó en el capítulo 4, la forma de estimar el valor de generación entrópica está vinculado al desgaste calórico en función del CO2, por lo cual, la tendencia de la producción de entropía por cada MWh es similar.

El conjunto de gráficas 5.13-5.24 muestra el comportamiento de las dos variables energéticas. Es acertado recordar que la generación de entropía es un indicador de sustentabilidad fuerte al dar cuenta de los balances energéticos y materiales del proceso económico. Con relación a la evolución del precio, la evidencia muestra que los niveles de generación actuales no permiten beneficiarse del orden de mérito. En cambio, la preferencia por los generadores de energía eléctrica limpia beneficia la disminución de emisiones y de entropía.

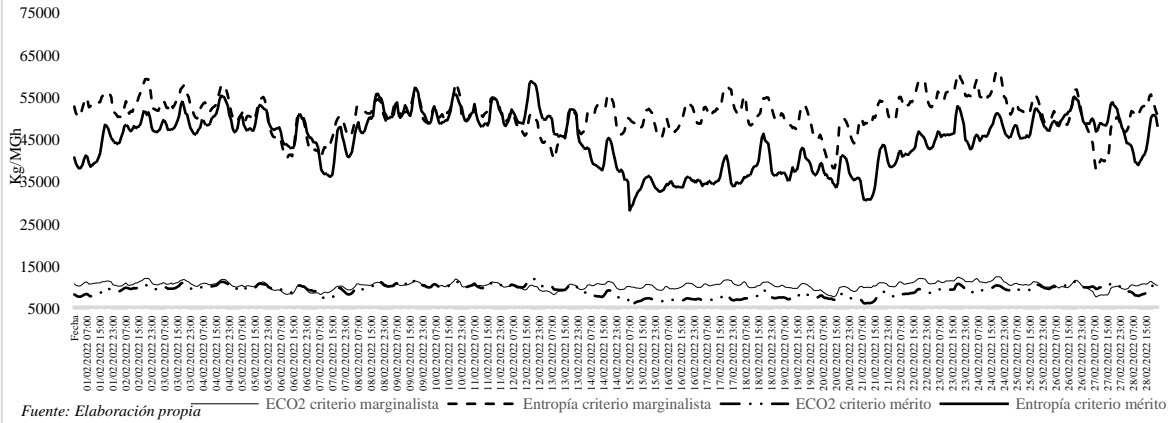
En efecto, el resultado de las simulaciones refleja las ventajas de elegir las plantas renovables. Si bien no cubren la demanda horaria y únicamente durante el mes de abril da beneficios, evita que toda la capacidad eléctrica de fuentes fósiles sea inyectada en la red eléctrica. Siguiendo el orden de preferencia del cuadro 5.4, en los primeros 4 turnos de proveeduría aparecen los generadores fotovoltaicos, solares y geotérmicos mientras en el último lugar está la combustión interna.

Calculando las tasas de crecimiento promedio diario, el orden de proveeduría en favor de las energías renovables favoreció la disminución de emisiones de CO2 y de la generación entrópica durante 10 de 12 meses. Únicamente los meses de noviembre y diciembre se presentó un ligero crecimiento. En términos de las emisiones de CO2 durante enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre disminuyeron en 3.49%, 11.45%, 8.06%, 9.09%, 9.68%, 2.79%, 9.41%, 10.34%, 5.19% y 4.23% respectivamente respecto a la trayectoria 1 bajo el criterio marginalista de determinación de precios. Mientras el mes de noviembre incrementó 1.18% y diciembre el 1.76%.

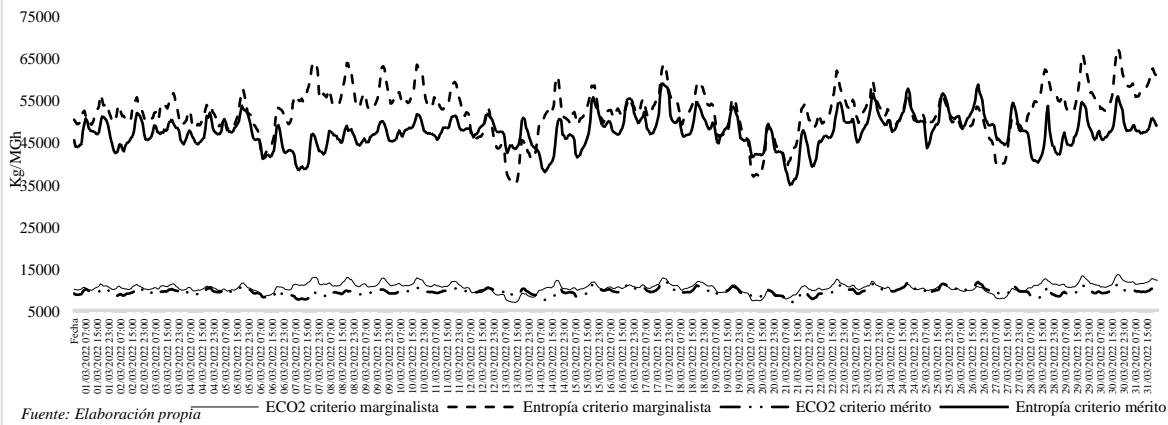
Con relación a la generación de entropía, la tasa de disminución promedio diaria del orden de mérito respecto al criterio marginalista es prácticamente la misma, 3.50%, 11.46%, 8.6%, 9.09%, 9.69%, 2.80%, 9.41%, 10.35%, 5.20% y 4.24% para los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre respectivamente.



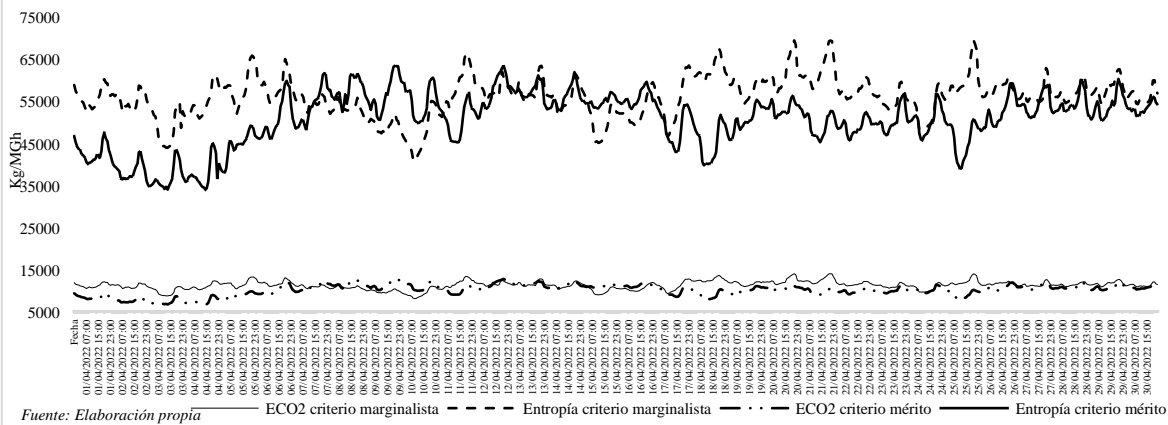
Gráfica 5. 14. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, febrero)



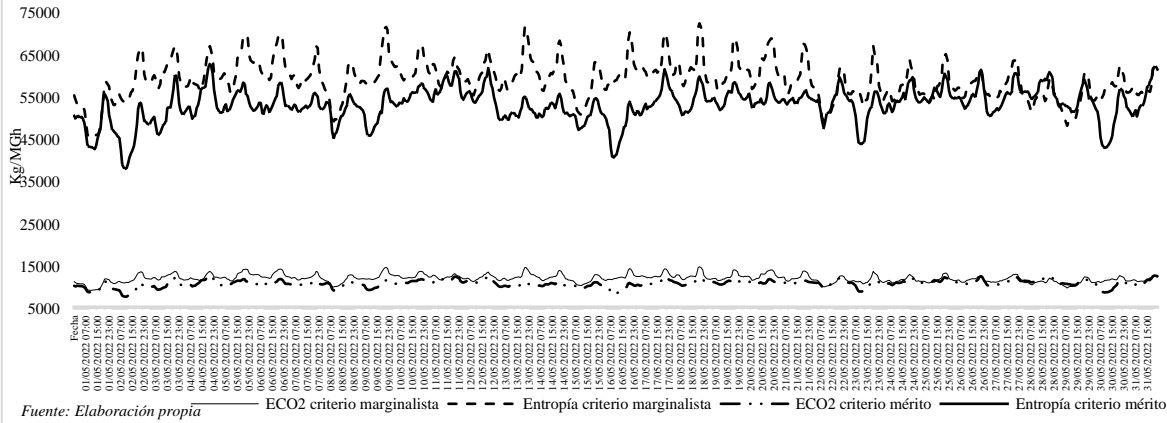
Gráfica 5. 15. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, marzo)



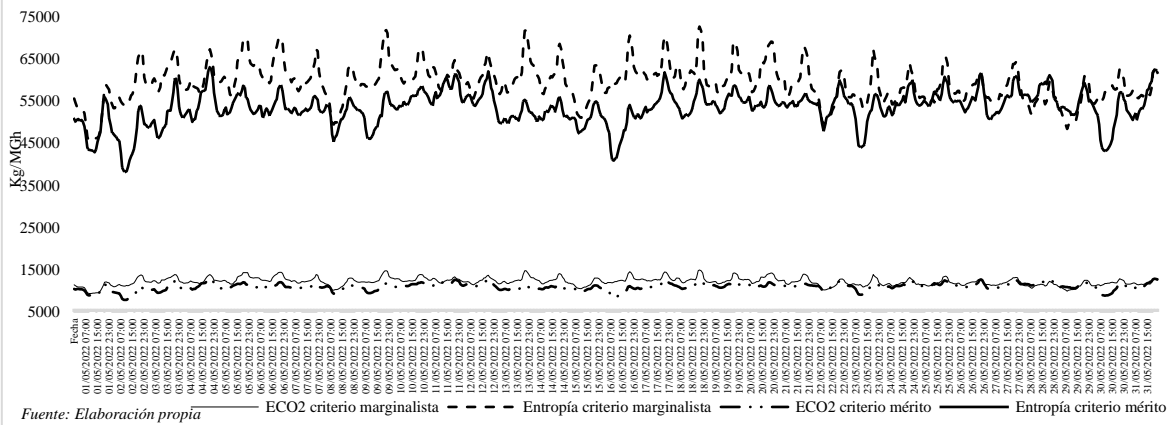
Gráfica 5. 16. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, abril)



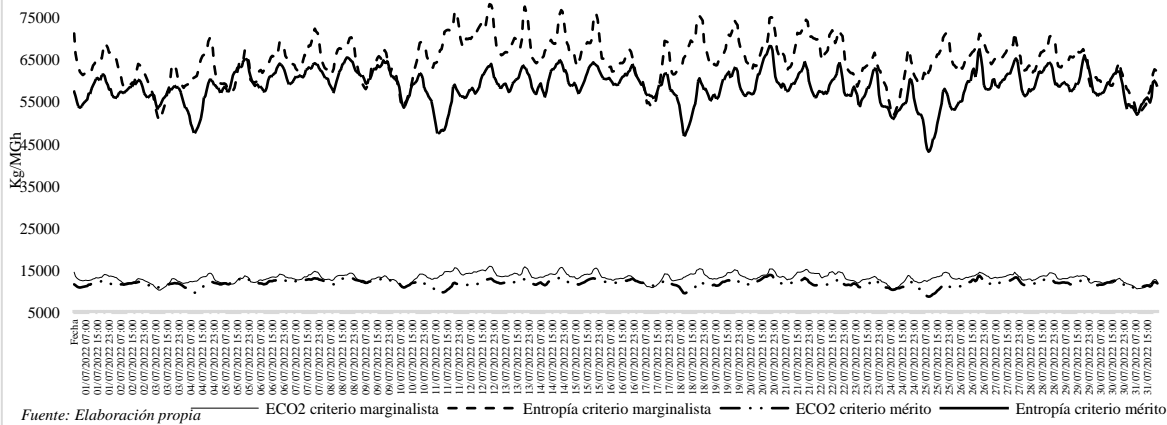
Gráfica 5. 17. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, mayo)



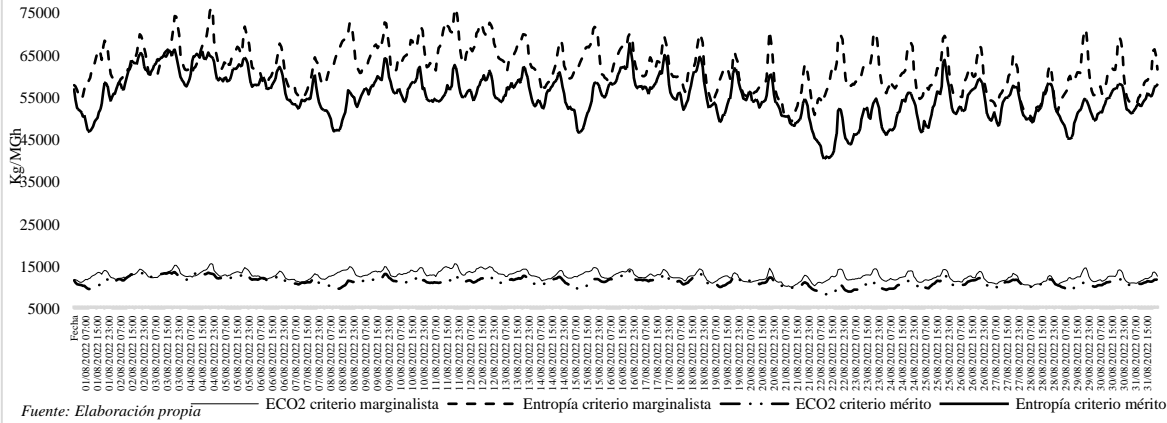
Gráfica 5. 18. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, junio)



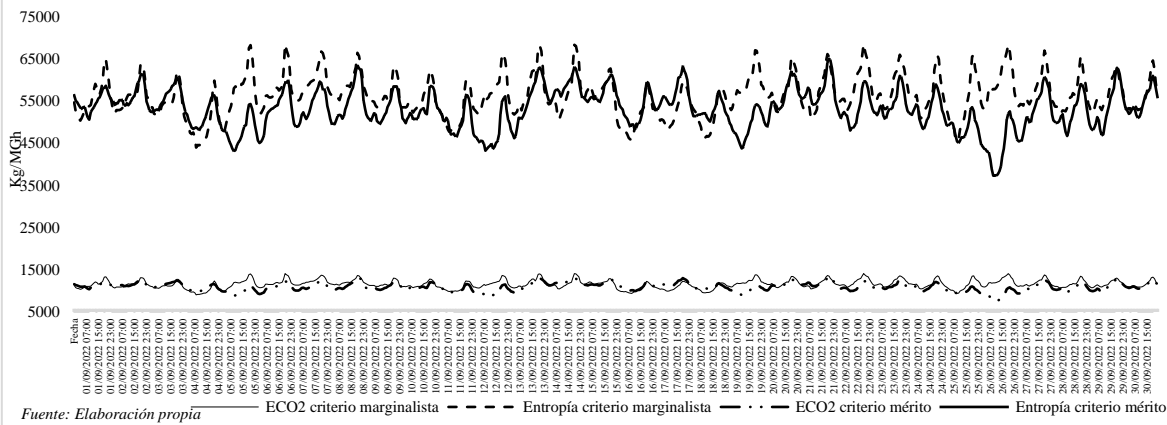
Gráfica 5. 19. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, julio)



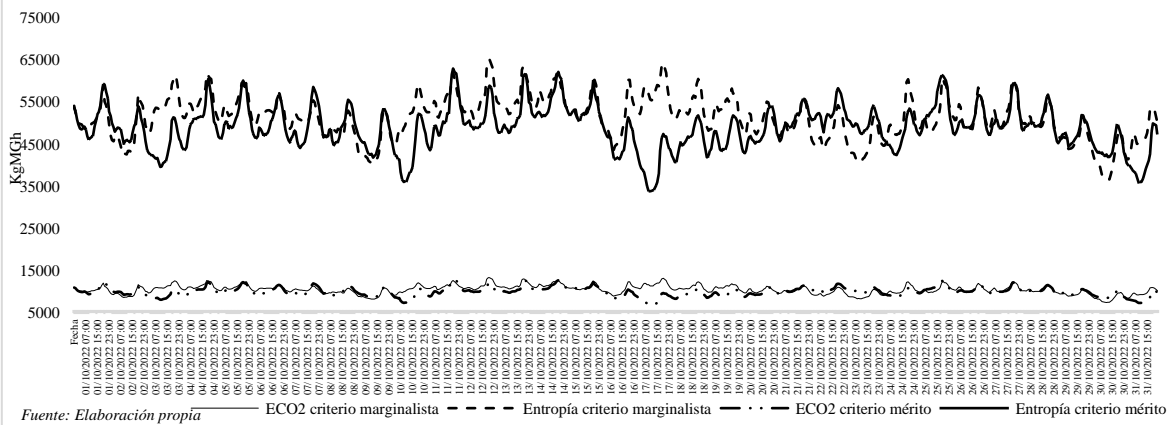
Gráfica 5. 20. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, agosto)

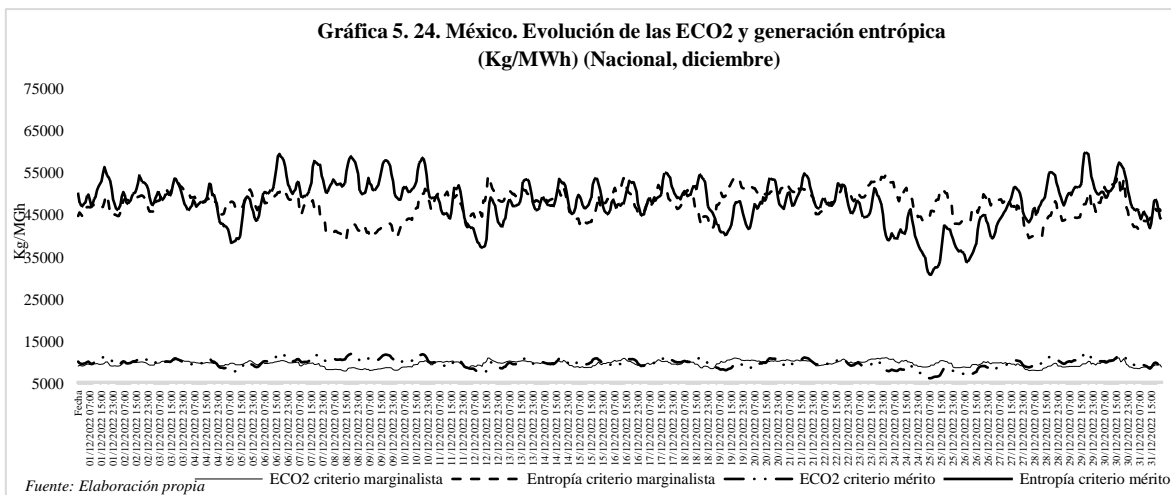
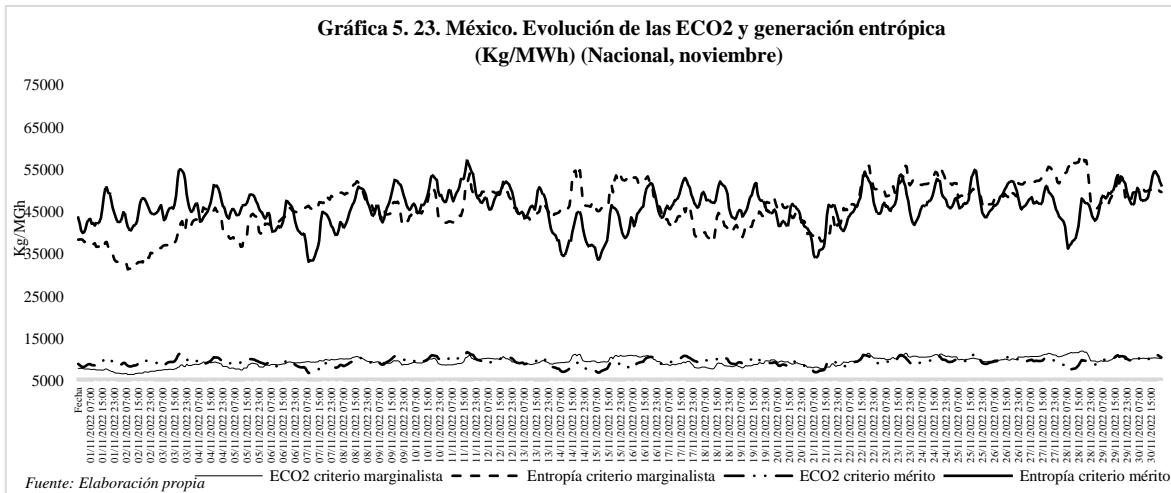


Gráfica 5. 21. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, septiembre)



Gráfica 5. 22. México. Evolución de las ECO2 y generación entrópica (Kg/MWh) (Nacional, octubre)





5.7.6 El papel de la reacción creativa y adaptativa

En la simulación se describe la posibilidad de reacción por parte de los productores con relación a la diferencia del ingreso estimado y el ingreso real basado en el precio de calculado y publicado por el CENACE. Debido a que los precios garantizan que los productores realicen la totalidad de sus planes productivos, en el sistema no hubo ningún mecanismo vía precios para detonar la respuesta creativa de los productores.

Si los precios del CENACE hubieran privilegiado estrictamente a ciertos productores de energía renovable, por las condiciones de la simulación, se hubiera activado la condición

de respuesta creativa y adaptativa frente a la brecha de ingresos. Frente a este comportamiento, queda como agenda pendiente la modificación de la simulación para introducir los intercambios de excedentes entre zonas con déficit. Como se apuntó previamente, el ejercicio requeriría una gran cantidad de recursos informáticos y elevaría suficiente la complejidad computacional.

5.7.7 La dinámica de la generación distribuida

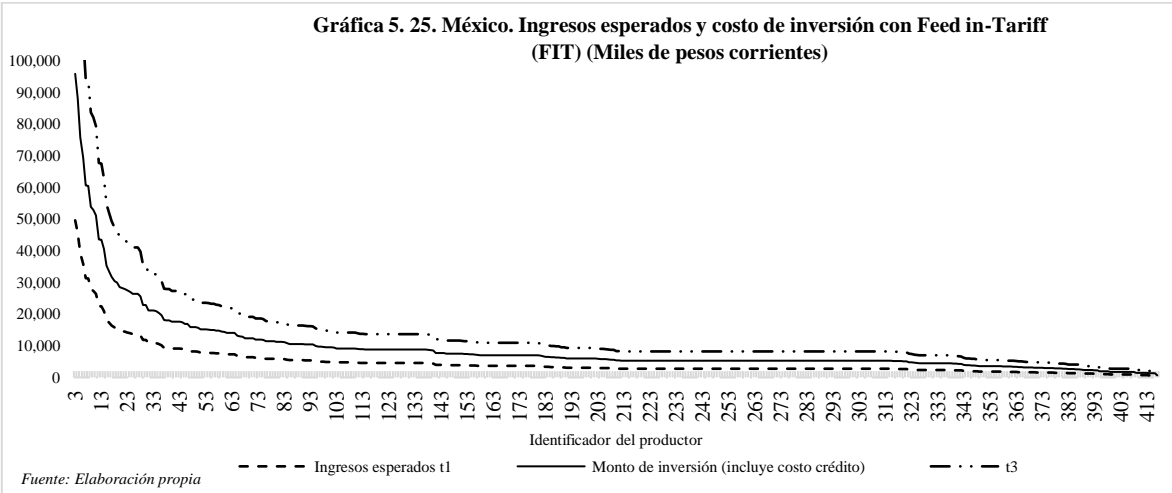
En las especificaciones de la simulación se plantea el análisis de la evolución de la generación distribuida a partir de la existencia de una tarifa de conexión preferencial estilo Feed-in Tariff. En el modelo se establece como un valor fijo ω por cada unidad de electricidad generada. Debido a la disposición del CENACE, los productores de generación distribuida tienen el derecho de recibir el precio que se oferta en el mercado mayorista. Por lo cual, si se encuentra bajo el régimen de venta de energía, puede trasladar su energía por la red eléctrica.

La simulación plantea un valor fijo determinado por el CENACE de 2.5 pesos por kWh de electricidad generado y exportado a la red eléctrica. El valor de referencia es el caso de Alemania de acuerdo con la ley de tarifas de conexión 2017. Siguiendo los pasos de la simulación, la existencia de la tarifa conduce a todos los agentes a producir.

Después de la definición sobre producir o no, los agentes consideran el ingreso esperado durante el lapso t . La simulación considera hasta 20 años, criterio utilizado en el caso de Alemania e India. De acuerdo con las estimaciones de la CRE, construir un generador solar con capacidad máxima de 500 kWh, límite de producción para los productores de esta modalidad, representa un gasto de 800 mil pesos (CRE, 2023).

Con los valores de la simulación descritos, los pequeños productores acuden al mercado y realizan sus planes de producción gracias a la existencia de una cuota fija por Kwh. Considerando la capacidad instalada inicial de cada uno de los 417 productores y un costo del crédito del 10%, La gráfica 5.25 muestra que tardarían tres años en amortizar el costo del crédito y tener ingresos positivos. Por lo cual, estimando los ingresos futuros durante 20 años que duraría la cuota FIT, la capacidad instalada de pequeños productores

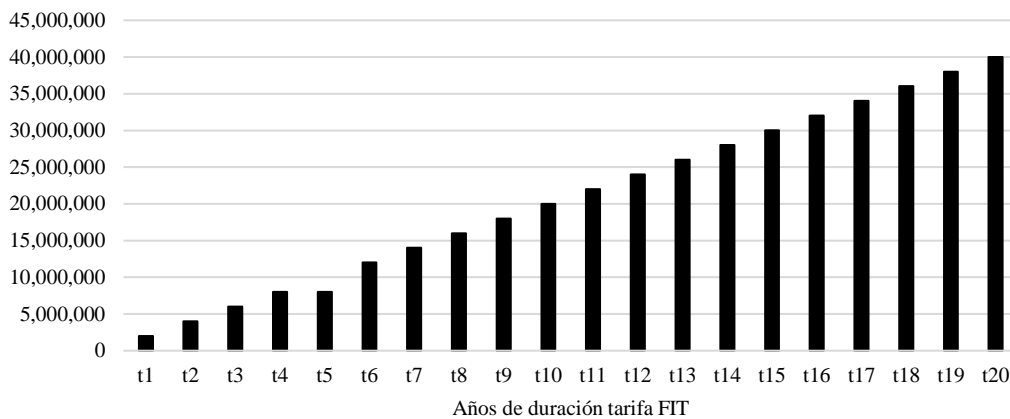
podría crecer más de 10 veces, de 1034.30 MWh anuales a 10705.08 MWh manteniendo los parámetros estables durante el periodo.



Existen dos implicaciones a considerar. La primera radica en la necesidad de incrementar la capacidad de la red de transmisión para evitar la saturación y con ello elevar el precio de la electricidad. Por otra parte, la existencia de una tarifa FIT para un periodo de tiempo prolongado como sugiere las experiencias internacionales analizadas en el capítulo 3, implica dos formas de financiamiento: i) transferir directamente al consumidor a través de incrementos en el recibo de electricidad, ii) subsidios del gobierno a través de la captación de recursos provenientes de otras fuentes de financiamiento público.

Una de las precauciones que se deben tomar con este tipo de medidas es la posibilidad de una expansión descontrolada de generadores de pequeña escala, provocando una distribución territorial desigual, incrementos permanentes en el subsidio y por ende utilización de recursos públicos para garantizar su financiamiento. El gráfico 5.26 muestra el costo anual de la medida considerando fijo el número de participantes bajo el esquema de generación distribuida. El costo inicial rondaría en el primer año de 2, 001, 085 pesos y el valor correspondiente al periodo 20 correspondería a 40 millones 21 mil 703 pesos corrientes del 2022.

Gráfica 5.26. México. Ingresos esperados y costo de inversión con Feed in-Tariff (FIT)
(Millones de pesos corrientes 2022)



Fuente: Elaboración propia

Bibliografía

1. Amblard, F. (2010). Construire des sociétés artificielles pour comprendre les phénomènes sociaux réels. *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 5(2), 69-77.
2. Antonelli, C., y Ferraris, G. (2011). Innovation as an emerging system property: an agent based simulation model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 14(2), 1.
3. Arifin, S. N., y Madey, G. R. (2015). Verification, validation, and replication methods for agent-based modeling and simulation: lessons learned the hard way!. *Concepts and methodologies for modeling and simulation: A tribute to Tuncer Ören*, 217-242.
4. BenDor, T., y Scheffran, J. (2018). *Agent-based modeling of environmental conflict and cooperation*. CRC Press.
5. Billari, F. C., Fent, T., Prskawetz, A., y Scheffran, J. (2006). Agent-based computational modelling: an introduction. *Agent-based computational modelling: applications in demography, social, economic and environmental sciences*, 1-16.
6. Chappin, É. J., Nikolic, I., y Yorke-Smith, N. (2020). Agent-based modelling of the social dynamics of energy end use. *Energy and Behaviour*, 321-351.
7. Epstein, J. M., y Axtell, R. (1996). *Growing artificial societies: social science from the bottom up*. Brookings Institution Press.

8. Fagiolo, G., Windrum, P., y Moneta, A. (2006). Empirical validation of agent-based models: A critical survey (No. 2006/14). LEM Working Paper Series.
9. Fonoberova, M., Fonoberov, V. A., y Mezić, I. (2013). Global sensitivity/uncertainty analysis for agent-based models. *Reliability Engineering & System Safety*, 118, 8-17.
10. Foramitti, J. (2023). A framework for agent-based models of human needs and ecological limits. *Ecological Economics*, 204, 107651.
11. Gallegati, M. (2018). *Complex agent-based models*. Berlin: Springer.
12. Guerini, M., y Moneta, A. (2017). A method for agent-based models validation. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 82, 125-141.
13. Hamill, L., y Gilbert, N. (2015). *Agent-based modelling in economics*. John Wiley y Sons.
14. Helbing, D. (2012). *Agent-based modeling*. Springer Berlin Heidelberg.
15. Lamperti, F., Dosi, G., Napoletano, M., Roventini, A., y Sapio, A. (2018a). And then he wasn'ta she: Climate change and green transitions in an agent-based integrated assessment model. *Scuola Superiore Sant'Anna, LEM Working Papers*, 14.
16. Lamperti, F., Dosi, G., Napoletano, M., Roventini, A., y Sapio, A. (2018b). Faraway, so close: coupled climate and economic dynamics in an agent-based integrated assessment model. *Ecological Economics*, 150, 315-339.
17. Moss, S. (2008). Alternative approaches to the empirical validation of agent-based models. *Journal of Artificial Societies and social simulation*, 11(1), 5.
18. Orcutt, G. (1957). A new type of socio-economic system. *The review of economics and statistics*, 116-123.
19. Poledna, S., Miess, M. G., Hommes, C., y Rabitsch, K. (2023). Economic forecasting with an agent-based model. *European Economic Review*, 151, 104306.
20. Silverman, E. (2018). *Methodological investigations in agent-based modelling: with applications for the social sciences*. Springer Nature.

21. Ten Broeke, G., Van Voorn, G., y Ligtenberg, A. (2016). Which sensitivity analysis method should I use for my agent-based model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(1), 5.
22. Tesfatsion, L. (2006). Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory. *Handbook of computational economics*, 2, 831-880.
23. Truong, M. T., Amblard, F., Gaudou, B., y Sibertin-Blanc, C. (2014). To calibrate & validate an agent-based simulation model-an application of the combination framework of bi solution & multi-agent platform.
24. Van Dam, K. H., Nikolic, I., y Lukszo, Z. (Eds.). (2012). *Agent-based modelling of socio-technical systems* (Vol. 9). Springer Science y Business Media.
25. Van Dinther, C. (2008). Agent-based simulation for research in economics. *Handbook on information technology in finance*, 421-442.

Conclusiones de la tesis

La tesis ha resultado en un interesante académico para la comprensión de la transición energética en México. Se trata de un tema clave en la agenda nacional e internacional. Actualmente, las perspectivas sobre política industrial sostenible, descarbonización y mitigación de los efectos adversos de la crisis ecológica coloca en el centro de la discusión la transición energética como sendero hacia la transformación socioambiental y económica.

Debido a su posición como principal generador de emisiones de efecto invernadero, el sector eléctrico se convierte en estratégico para encadenar una serie de cambios sustantivos en la economía. Particularmente, en el consenso internacional hacia la electrificación, el resto de industrias se alinean al incremento de disponibilidad eléctrica, mientras se piensa en la creación de nuevos empleos a causa de la transformación. Al mismo tiempo, la transformación se desenvuelve dentro de un contexto político y territorial específico.

En la actualidad, el SEM está involucrado en una disputa ideológica llevada a una dicotomía en la cual la incorporación de generadores privado representa el triunfo del neoliberalismo mientras que desde el gobierno federal se reafirma la intervención gubernamental bajo el escudo de soberanía energética. Por otro lado, las formas tradicionales de generación eléctrica tienen asociado un consumo energético elevado mientras que el despliegue de formas alternativas de generación eléctrica renovable, en algunos casos, se enfrenta a la resistencia territorial por los conflictos ambientales a causa de la mala gestión de las negociaciones entre los propietarios de las tierras y las afectaciones ambientales a causa de la creación de la infraestructura.

El análisis de este sector y su compleja dimensión se vuelve una tarea complicada de analizar por su carácter histórico, económico, sistémico y territorial. Para ello, esta tesis desde el título se planteó un objetivo amplio y ambicioso el cual estableció una propuesta de integración teórica para entender el proceso de transición energética en México. También, busca sumar en la discusión actual sobre sustentabilidad ambiental considerando el proceso económico bajo la óptica de Nicholas Georgescu-Roegen (1971). Es decir, partir que todo

acto económico implica un desgaste de materia y energía insustituibles, por lo cual, es relevante reconsiderar las perspectivas sobre sustentabilidad e incorporar los balances de materia y energía dentro de la contabilidad económica.

La presente tesis doctoral se divide en 5 capítulos. El primero titulado “Pensamiento económico y cambio climático: una relación compleja” tiene el objetivo de desarrollar una discusión conceptual sobre el papel de la naturaleza dentro del pensamiento económico. La discusión se planteó necesaria para comprender la relación de las teorías económicas con la consideración de la naturaleza. La revisión muestra que, si bien al inicio de la institucionalización del pensamiento económico clasificadas en grandes escuelas existía una noción mínima de la naturaleza en el desempeño económico, evidentemente su comprensión la sitúa como un factor más de la producción, con excepción de la escuela francesa de economía fisiócrata.

La ausencia de un marco holista para incorporar a la naturaleza dentro del análisis económico se impulsó en gran medida con la economía neoclásica. Debido a las características de su núcleo epistemológico, la economía se concibió tal si fuera un espacio cerrado donde el comportamiento racional del individuo y las reglas de oferta y demanda permite alcanzar el mejor funcionamiento del mercado. A partir de esta visión, se consolidó una separación del ciclo económico con referencia al mundo natural, aún de la clara dependencia de la producción respecto a los servicios naturales. Así, se logró un consenso para tratar los problemas asociados a la explotación de la naturaleza como una externalidad.

Desde la perspectiva expuesta en la tesis, el desacoplamiento gradual de las cuestiones ambientales en la economía se vincula fuertemente al marco teórico de referencia y a la victoria contundente de la economía neoclásica en los planes de estudio, siendo referencia casi única para la elaboración de política económica, energética y ambiental. Realizando un análisis justo hacia las contribuciones de la economía neoclásica respecto a las consideraciones ambientales, existen ejercicios muy interesantes para atribuir el valor a

los servicios ambientales. Sin embargo, se considera limitado el enfoque para entender los cambios de largo plazo entre el mundo económico, social y ambiental.

Es gracias al desarrollo de enfoques considerados heterodoxos, como la economía ecológica, que se recuperó la visión sistémica del proceso económico, las múltiples implicaciones del agotamiento y degradación del espacio natural y el valor que transfieren los servicios ambientales a la elaboración de mercancías.

Por ello, una de las conclusiones que se derivan del capítulo uno es las bases epistemológicas desde la economía ecológica, principalmente la bioeconomía, son pertinentes para entender la interacción entre economía y medio ambiente, recuperando las bases biofísicas de las cuales depende el ciclo económico. Integrar esta perspectiva es fundamental en el debate de la transición energética como fenómeno sistémico. Asimismo, se asume que la manifestación e intensidad del cambio climático son consecuencias del incremento de entropía. Otra conclusión del capítulo es la necesidad de actualizar las bases epistemológicas de las teorías económicas para integrar el debate sobre la crisis climática y ambiental. Diversas disciplinas científicas están impulsando el desarrollo de corrientes analíticas para sumar al debate multidisciplinario y la economía sigue concentrada en las metodologías convencionales

A pesar de su potencial, la bioeconomía, y de forma general la economía ecológica, siguen teniendo espacios sin cubrir respecto a múltiples fenómenos económicos⁹¹. Para fines de la investigación, carece de mecanismos para explicar los incentivos a producir, el comportamiento de los actores económicos, los mecanismos de interacción, internalización del problema climático, la dinámica sistémica, la influencia institucional, el surgimiento de las innovaciones, el rol de las regulaciones estatales, las reglas y rutinas productivas.

⁹¹ Entre las críticas más sólidas se encuentra las de Nadal (2011) al referir a la falta de una teoría de formación del capital, sobre la naturaleza del dinero, entre otras. Disponible en <https://www.sinpermiso.info/textos/los-problemas-de-la-economia-ecologica-parte-i-respuesta-a-jordi-roca>

Una forma de atender estas ausencias, el capítulo dos “*Hacia una propuesta de integración de la economía, ecología, sociedad y entropía: el modelo multinivel bioevolutivo para el análisis de la transición sociotécnica, se desarrolla el Modelo Multinivel Bioevolutivo (MMB)*” con la finalidad de contribuir a comprender los espacios de incidencia del cambio climático sobre la economía. El MMB es resultado de la microfundamentación del Modelo Multinivel desarrollado por Geels (2019). El desarrollo del modelo contempla tres espacios de interacción, macro-meso-micro. Al tratarse de un análisis sistémico y dinámico, el cuadro integrador de referencia es el marco conceptual de los sistemas complejos adaptativos. Con relación al comportamiento de los actores económicos y su comprensión del problema climático se utiliza las bases conceptuales de la economía evolutiva.

En conjunto, el MMB es un aporte teórico para comprender de una manera formal el impacto del cambio climático sobre la economía. Al mismo tiempo, la incidencia del proceso económico en el incremento de entropía. A nivel macro el sistema captura la irreversibilidad del proceso económico en términos energéticos y materiales. A nivel meso, el aparato institucional y funcionamiento del Estado son claves para crear y difundir el mensaje sobre el problema climático. Debido a la capacidad cognitiva de los actores económicos, son capaces de internalizar la emergencia climática y realizar modificaciones a sus estructuras productivas.

En la escala micro, las empresas visualizan, en conjunto, el problema climático, las restricciones gubernamentales hacia los métodos de generación fósil y los cambios de la demanda hacia patrones de producción más limpios, como factores clave hacia la actualización de las rutinas productivas. Dentro del proceso, existen empresas con capacidades adaptativas y creativas para renovar e instaurarse en caminos de producción sustentables en términos entrópicos. Las empresas adaptativas verán en el diferencial de ganancias favorables a quienes adapten su producción un incentivo de mercado para sumarse a la nueva trayectoria. Su grado de adaptación dependerá principalmente de incentivos a la innovación y desarrollo, las derramas del conocimiento, las capacidades de absorción y la

disponibilidad crediticia. Simultáneamente, se sujeta a la valoración social pues siempre y cuando disminuya el nivel entrópico las nuevas rutinas productivas son aceptadas.

Una conclusión interesante del modelo es la importancia del espacio meso para internalizar la dimensión climática y ecológica al sistema económico y social. Como se apuntó en el capítulo, la capacidad cognitiva del ser humano impide visualizar los fenómenos climáticos como una urgencia. Así, la estructura institucional es clave. Adicionalmente, en la literatura económica evolutiva no hay demasiadas referencias para analizar el papel de las innovaciones en un marco de cambio climático. En el MMB se explica la innovación de forma endógena del sistema resultado de la microfundamentación de los actores económicos.

Tal y como se señaló en el párrafo previo, la dinámica del modelo intenta contribuir a la comprensión de la innovación como un factor endógeno de la dinámica. Con estas bases, el MMB explica los factores que inciden en el proceso de transición energética desde una perspectiva sociotécnica. Esta definición va más allá del factor tecnológico sino incorpora la dimensión entrópica y social pues describe los elementos que potencian y obstaculizan la transformación de la matriz energética.

Finalmente, el capítulo 2 cierra con la construcción de una taxonomía de la transición sociotécnica. Las 4 rutas que puede tomar la transición energética con base en el MMB son: i) transición eléctrica comunitaria de ida y vuelta, ii) transición eléctrica de gobernanza amplificada, iii) transición eléctrica de descentralización variada y iv) transición eléctrica de régimen y paisaje condicionado. Las rutas construidas permiten comprender la dinámica de transición del sector eléctrico.

Las principales diferencias entre ellas radican en la regulación institucional, el tipo de empresas en las cuales aparece la innovación hacia tecnologías limpias y el marco legal para su desarrollo. En el primer caso (i) se trata de modelos de transición donde los pequeños productores de electricidad son quienes comandan el proceso de transición hacia fuentes renovables, sin embargo, el marco legal y el funcionamiento técnico de las redes de transmisión y distribución representan una barrera para su total amplitud. En el segundo caso

(ii), hace referencia a una voluntad política para disminuir la participación de energías fósiles. El caso (iii) prioriza la participación privada de las empresas y el papel del Estado con mínimas intervenciones. Finalmente, el caso (iv) enfatiza en los factores culturales, geográficos, sociales y técnicos que impiden la difusión de las energías renovables.

Con la base teórica sólida, el resto de capítulos de la tesis se analiza de forma práctica el proceso de transición sociotécnica. El capítulo 3 “La transición energética internacional” utiliza el MMB y la taxonomía que se deriva para analizar el caso de 5 países, cuyo camino de transición es representativo de un gran conjunto de países a nivel internacional: China, India, Reino Unido, Alemania y Estados Unidos.

El caso de China destaca por el impulso del Estado para construir capacidades tecnológicas en los nichos de energía renovable, siendo la construcción de paneles solares el objetivo. El Estado transformó su posición en el mercado al pasar de un esquema centralizado hacia el impulso de tecnologías limpias. Una lección relevante fue el establecimiento de una economía objetivo basado en el empoderamiento del consumidor y la posibilidad de construir sistemas de electricidad inteligentes donde cada usuario tiene la posibilidad. Respecto a las barreras, una lección fue la falta de conocimiento de la banca regional para el desarrollo de capacidad instalada eólica y solar, provocando saturación de la red.

El proceso de transformación energética en India refleja la imposición desde el gobierno de un plan ambicioso, pero se enfrenta a resistencias culturales y rigidez de la demanda. Por ejemplo, el pago de electricidad en regiones cuya cosmovisión la consideraba un bien gratuito. En otro lado, el rol del gobierno fue un revulsivo para la maduración de las energías renovables a través del ofrecimiento de créditos, tasas de ganancia garantizadas y obligatoriedad en la compra de electricidad de pequeños productores.

Reino Unido es considera un ejemplo a nivel internacional de las buenas prácticas para el desarrollo de energía renovable en la electricidad. Romper con el oligopolio eléctrico denominado “Big six” fue la descentralización en la generación eléctrica, la obligatoriedad de compra a los productores renovables, la oferta de apoyos económicos para la generación

de electricidad a nivel de comunidades, la instalación de paneles solares en los hogares y el acceso a esquemas de financiamiento a los generadores comunitarios con el decreto de la Ley de Sociedades de Beneficio Comunitario y Cooperativo.

El caso británico muestra distintas etapas de maduración en el crecimiento de la red de productores renovables, particularmente, la ausencia de tarifas mínimas que garantizara la rentabilidad de nuevos proyectos hasta el establecimiento de la Feed-in Tariffs (FIT) y la ausencia de precios mínimos para los combustibles fósiles con el fin de mantener incentivos en el desarrollo de energías renovables.

Un país con mayor experiencia en materia de energía renovable es Alemania. El desarrollo del *Energiewende* -paquete de medidas para disminuir las emisiones de efecto invernadero- delineó la hoja de ruta para la sustitución de fuentes fósiles, el desacoplamiento de la energía solar y el fortalecimiento de la energía comunitaria. El conjunto de reformas contempla el cobro de impuestos a las emisiones contaminantes para financiar la transmisión, el establecimiento de metas anuales en el porcentaje de emisiones, determinación de tarifa FIT, subsidios, préstamos bancarios y un programa de gestión de la red eléctrica para evitar exceso de oferta de los nuevos generadores.

El caso estadounidense representa un proceso complejo de desregulación y coordinación estatal acompañado de fuertes leyes regulatorias. Cada estado tiene la capacidad de establecer plazos y metas de generación. En términos de generación, destaca el reconocimiento de generación eléctrica comunitaria.

El conjunto de lecciones expuestas en el capítulo tres permite comprender la dinámica relativa del sector eléctrico mexicano. El capítulo 4 “*El paradigma eléctrico en México: análisis de los determinantes de la transición sociotécnica y su desempeño bioeconómico*” evalúa el desarrollo del sector eléctrico en México desde sus orígenes. El MMB permitió delinear los factores que, en las primeras etapas de la consolidación de la electricidad en el país, favorecieron la transformación profunda. Un elemento clave para su consolidación ha sido el impulso organizacional e institucional como la Ley General de Servicios Públicos, la

fundación del Instituto de Investigaciones Eléctricas, la creación de entidades como el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) que permitió la homologación del sistema de generación para todos los generadores.

En la primera etapa del sector, existieron barreras para la diversificación de plantas de generación, concentrando las capacidades técnicas y la inversión en la hidro y termoeléctrica. El mercado eléctrico mexicano hasta 1992 fue controlado completamente por el Estado a través de las entidades paraestatales.

El proceso de liberalización del SEM estuvo alienado a la dinámica internacional. La apertura a los inversores privados fue la respuesta ante la gran carga de la deuda frente a la ineficiencia financiera. El gran cambio en la narrativa de la gestión eléctrica nacional se dio con la Reforma Energética del 2013. Si bien existieron esfuerzos al inicio del siglo XXI para integrar las fuentes alternativas de energía y disminuir el nivel de emisiones, las modificaciones a la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) y la Ley del Servicio Público profundizaron las ambiciones por incrementar la energía eléctrica proveniente del sol y el aire.

La industria mexicana se alineó a los compromisos en materia ambiental contraídos a nivel internacional, creando ley y fideicomiso para la transición energética, estableciendo metas de emisiones para el sector eléctrico plasmados en el Plan de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional (PRODESEN), la creación de un mercado mayorista donde se efectúan subastas de electricidad renovable y quizá lo más importante la integración al sistema eléctrico de pequeños productores bajo la figura de generación descentralizada.

El actual desempeño del SEM muestra claros y oscuros. Es favorable la ratificación de los acuerdos en materia ambiental en la dinámica del sector y la hoja de ruta para disminuir el nivel de emisiones de efecto invernadero. Sin embargo, una de las conclusiones relevantes versa sobre la falta de mecanismos para acelerar y profundizar la generación de energía eléctrica renovable.

Las lecciones del capítulo 4 muestra que la política energética mexicana carece de instrumentos para el estímulo de la generación eléctrica limpia, comenzando por la falta de compromiso gubernamental para convertir al Estado en comprador de la energía limpia, la falta de infraestructura para la transmisión y distribución de la electricidad, la ausencia de créditos para el fortalecimiento de la generación distribuida, falta de tasas de retorno, desarrollo de capacidades privadas y públicas en favor de la construcción de tecnología nacional, ausencia de un plan nacional de desarrollo eléctrico renovable con metas, fechas, compromisos y rutas para el crecimiento del potencial eléctrico renovable, elevados niveles de subsidios a las energías fósiles, falta de proyectos regionales y desarrollo de facultades institucionales.

Sobre el último punto, las actuales instituciones encargadas de la generación y supervisión del desarrollo del SEM nacieron en un contexto diferente lejos de la preocupación ambiental y climática. En particular, las entidades preponderantes del SEM, Comisión Federal de Electricidad y la extinta Luz y Fuerza del Centro estuvieron a cargo de la industrialización del país bajo una lógica de mínimos costos y maximización de la generación eléctrica. Por lo cual, el reto de impulsar el crecimiento económico para atender la falta de servicios públicos, baja productividad y mejorar los salarios en un contexto de cambio climático y crisis ambiental exige revolucionar las capacidades institucionales y mejorar el desempeño de las instituciones encargadas de la dinámica del sector.

Actualmente, como se apuntó previamente, el sector eléctrico es clave en la consolidación de un nuevo perfil competitivo al tiempo que garantice un desarrollo industrial sostenible energéticamente. El tamaño del reto exige ir más allá de la polémica actual sobre el sector basado en una visión ideológica donde no importa la protección del medio ambiente sino mantener los mismos métodos de generación basado en fósiles bajo la idea de soberanía energética.

Un análisis socioambiental como el expuesto en la tesis reconoce las implicaciones ecológicas de la transición. Si bien existe en la LIE varios capítulos dedicados al proceso de

negociación entre las comunidades y los actores privados para el desarrollo de capacidad instalada solar y eólica, en muchas ocasiones no son respetados y se convierten en conflictos territoriales. Si la ley no se hace cumplir, el desarrollo de nuevas plantas de generación limpia implicará tensiones con los poseedores del territorio con alto potencial energético.

En materia de generación distribuida, es un logro su reconocimiento en la ley. No obstante, se tratan de cimientos que falta solidificar y seguir desarrollando. Se trata de una serie de principios técnicos en la LIE y el Manual de Interconexión de Centrales de Generación Distribuida, en los cuales no se tiene ninguna meta, ruta y visión hacia dónde se busca llegar. Los casos internacionales como Reino Unido y Alemania puede ser buenas prácticas replicables en el SEM. Es importante dotarle de elementos socioambientales al desarrollo de la generación eléctrica comunitaria comenzando con el otorgamiento de créditos, tarifas de conexión con tasas de retorno garantizada, obligatoriedad de compra y extensión de la red eléctrica.

Una discusión que surge en la gestión actual del SEM es sobre el federalismo energético. Todo el actuar y desarrollo del sector está restringido al nivel federal dejando de lado la gestión estatal. En el caso de la generación distribuida únicamente los estados de Jalisco y Nuevo León se han encargado de impulsar dicho esquema y ganar espacio a la práctica pública.

El capítulo final de la tesis concluye con un ejercicio de simulación sobre lo que podría ser el desarrollo del SEM con la implementación de ciertos instrumentos de gobernanza energética diagnosticados en el capítulo 4: el orden de mérito y la tarifa de conexión Feed-in Tariffs.

La construcción de las trayectorias responde al carácter empírico de la investigación. Se buscó la concordancia entre el marco teórico y el modelo, por lo cual, la metodología elegida fue los modelos basados en agentes. Debido a que se trata de técnicas informáticas, se recurrió a la asesoría de la Facultad de Informática de la Université Toulouse 1 Capitole.

Las tres trayectorias construidas buscan comparar el sendero vigente del SEM respecto a la implementación del orden de mérito y la creación de una tarifa FIT para el impulso de la generación distribuida. Los resultados muestran que actualmente no existe la capacidad de implementar un orden de mérito en la proveeduría de electricidad principalmente por la falta de capacidad instalada de tecnologías renovables. En materia de emisiones de dióxido de carbono y de entropía, el modelo mostró que, si bien el orden de mérito no es capaz de reducir el precio del componente de electricidad, tiene un impacto positivo en la reducción del impacto energético. Esto puede deberse principalmente a la preferencia de las plantas eólicas y solares para cubrir la demanda inicial, con la cual, reduce la participación de las plantas convencionales.

Finalmente, la tercera trayectoria con base en la tarifa FIT para la generación de distribuida muestra un desempeño favorable siempre y cuando se cuente con disponibilidad de inversión para incrementar la capacidad instalada. Asimismo, exige el incremento de la red eléctrica para traducir las ganancias del incremento de electricidad de pequeña escala en disminución de precios.

Con los resultados de la tesis se logra validar parcialmente la hipótesis de investigación la cual establece la importancia de incorporar a los pequeños productores en la generación eléctrica y la participación estatal y privada para transitar hacia una trayectoria de sustentabilidad.

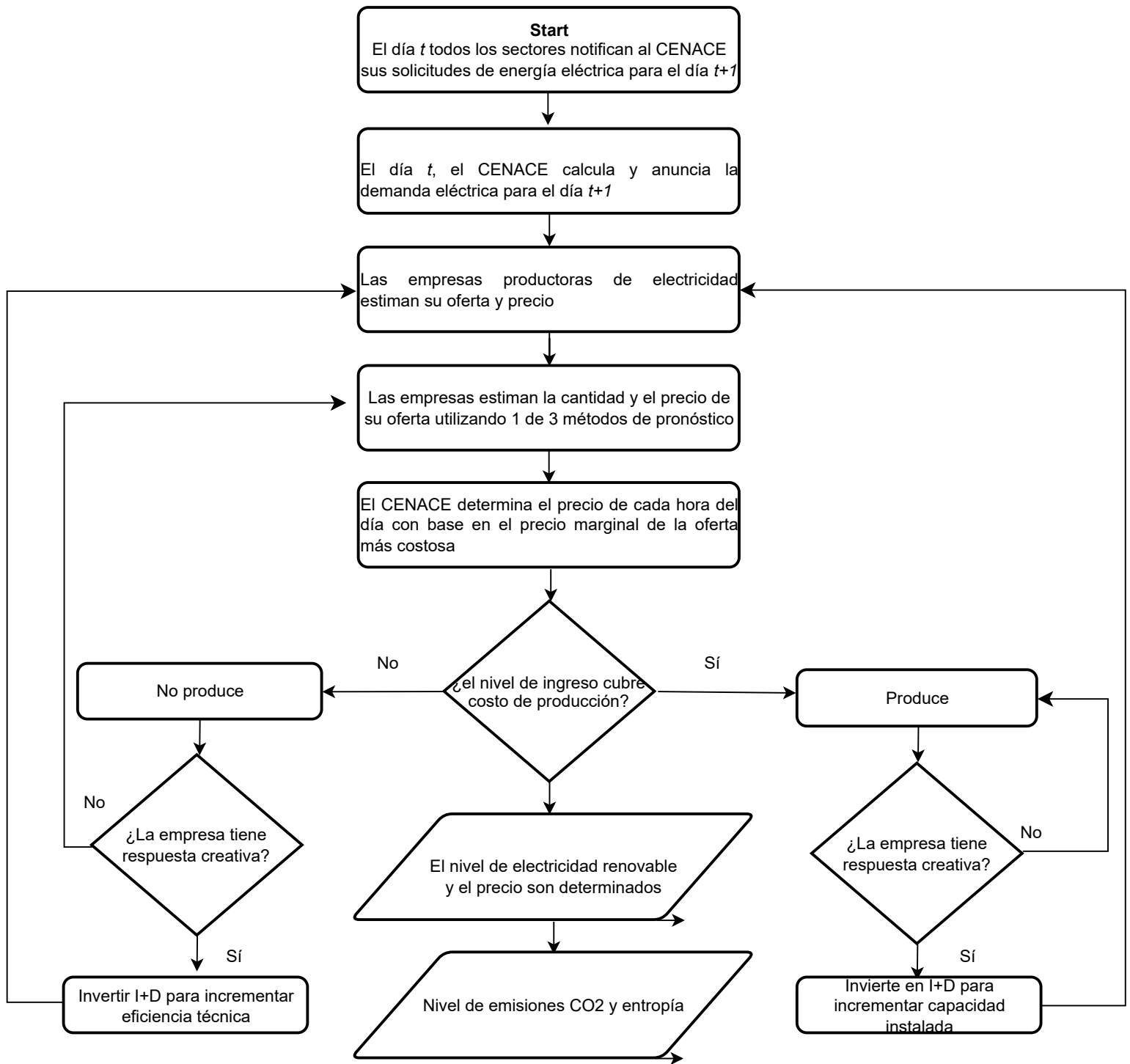
El trabajo demuestra la importancia de considerar el proceso de transición energética como un proceso sistémico y evolutivo. El SEM tiene muchas áreas de mejorar, sin embargo, se requiere de un plan de transformación amplio con metas claras hacia dónde se quiere llegar. La incorporación de energías renovables en el SEM y en la economía es una discusión que debe afrontarse y es impostergable.

Los hacedores de política ambiental, económica y energética deben considerar que se trata de un fenómeno de largo plazo y gradual. Cada movimiento definirá la clase empresarial a la cual beneficiarán y trastocarán intereses económicos que se benefician de la economía.

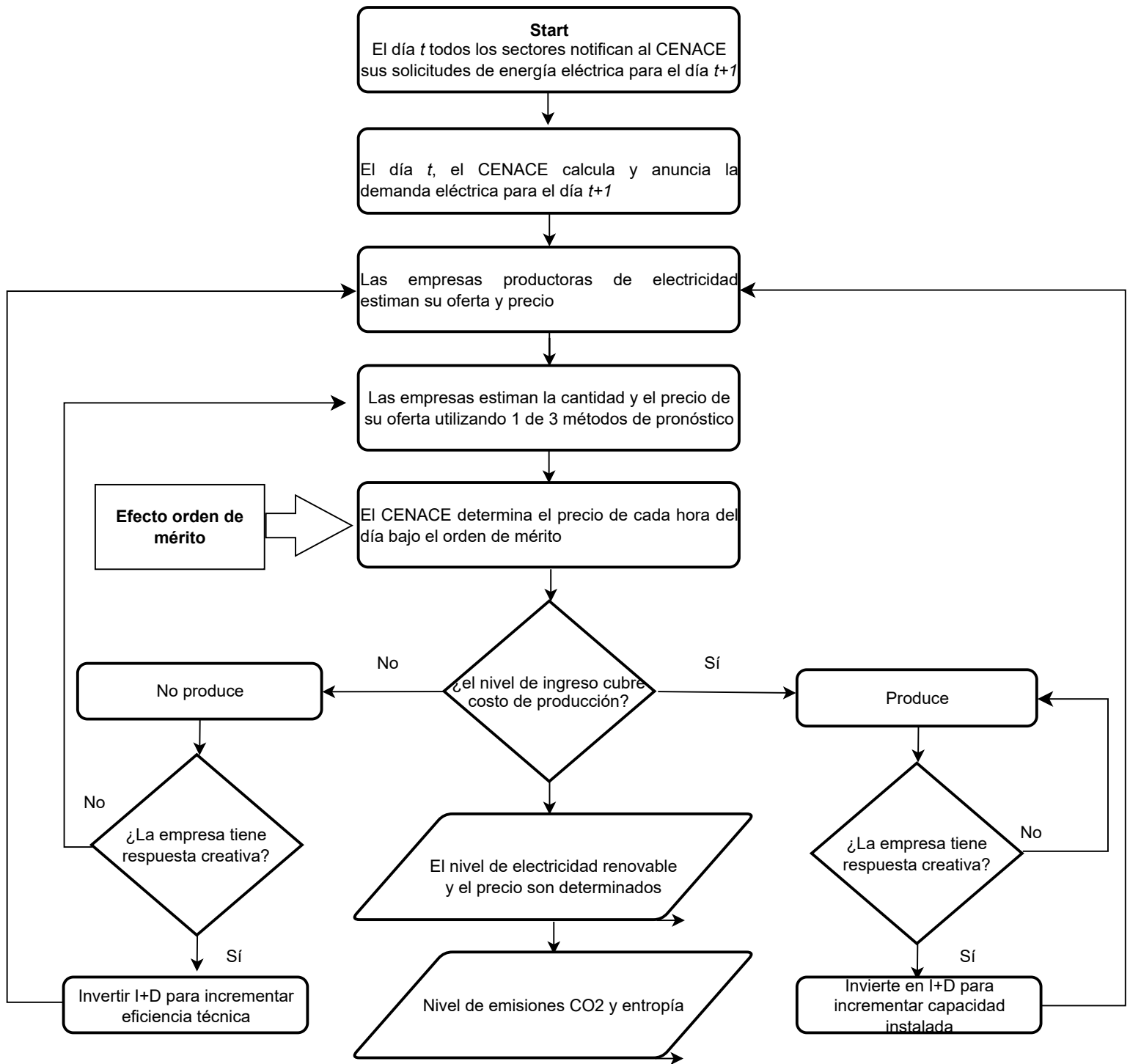
Es urgente incorporar una visión de la transición más allá del componente tecnológico. Se trata de una situación de disputa donde existen ganadores, tensiones y perdedores. Una buena política para la transición debe integrar a los actores excluidos del esquema de generación, mitigar los conflictos ambientales, garantizar condiciones favorables de negociación para la energía comunitaria y verificar la sustentabilidad energética en términos de indicadores robustos como la entropía. México se enfrenta a una ola mundial sobre las fuentes renovables y debe acelerar las capacidades públicas, institucionales, legales, tecnológicas, organizacionales para garantizar una transición energética en el SEM justa y rentable.

ANEXO I

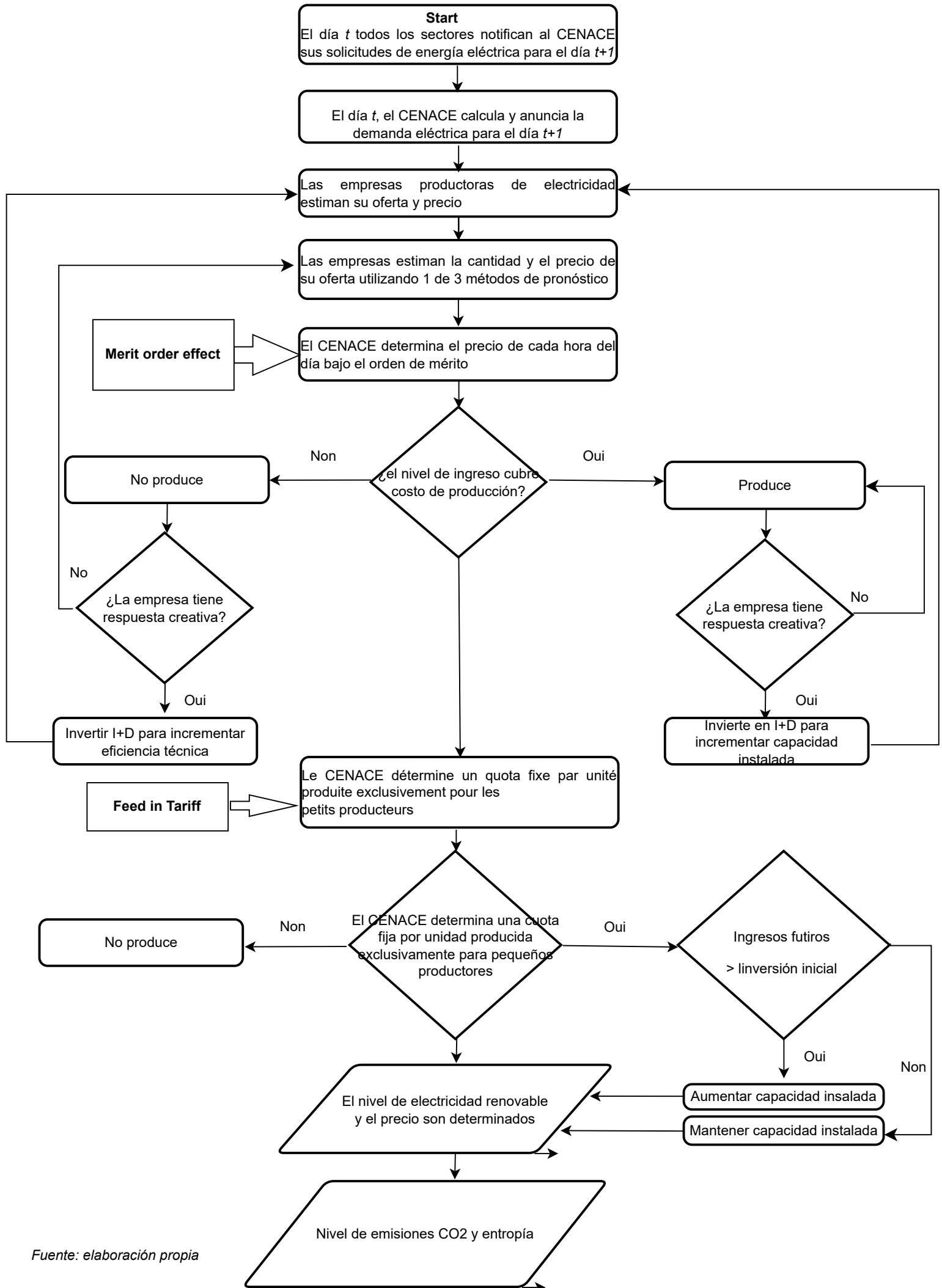
Anexo 1. Diagrama 1. Modelo 1
Criterio marginalista



Anexo 1. Diagrama 2. Modelo 2
Criterio orden de mérito

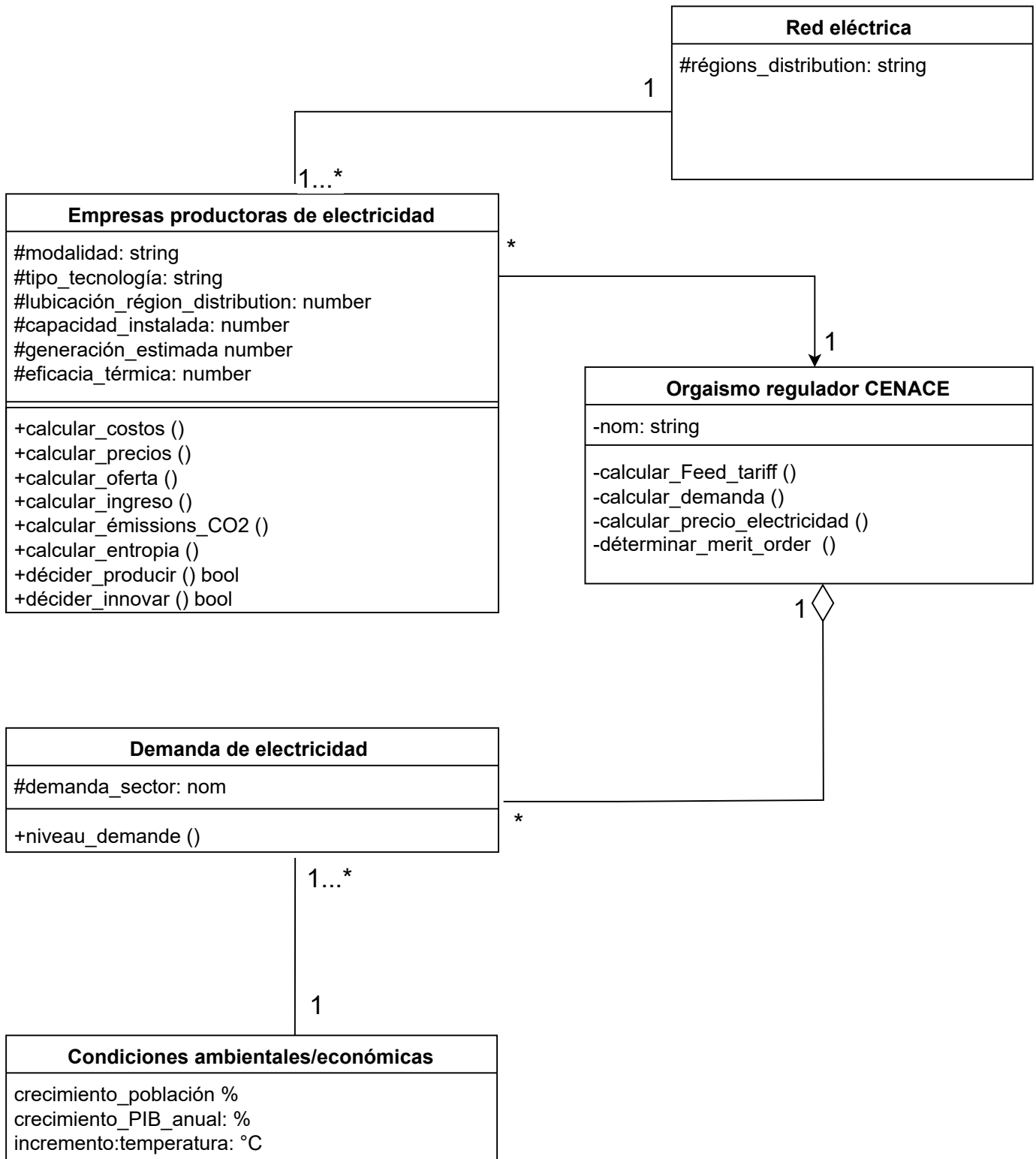


Anexo 1. Diagrama 3. Modelo 3
Criterio Feed in Tariff



ANEXO II

Anexo II. Diagrama de clases



ANEXO III

El código de programación de los modelos puede consultarse en el siguiente repositorio

<https://docs.google.com/document/d/1NvQmYSLvjXe5BpHacU3n6jbMn7sByofJ/edit?usp=sharing&ouid=113509928765928384703&rtpof=true&sd=true>



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE DISERTACIÓN PÚBLICA

No. 00033

Matrícula: 2181801250

Cambio climático, economía y entropía: una propuesta socioecológica de integración para la transición energética del sector eléctrico de México.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 11:00 horas del día 31 del mes de mayo del año 2024 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DRA. GRACIELA CARRILLO GONZALEZ
DRA. GEORGINA ALENKA GUZMAN CHAVEZ
DR. ALEJANDRO DAVILA FLORES
DR. ALEJANDRO JOSE LOPEZ FELDMAN

Bajo la Presidencia de la primera y con carácter de Secretario el último, se reunieron a la presentación de la Disertación Pública cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS ECONÓMICAS

DE: GABRIEL ALBERTO ROSAS SANCHEZ

y de acuerdo con el artículo 78 fracción IV del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

Acto continuo, la presidenta del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



GABRIEL ALBERTO ROSAS SANCHEZ
ALUMNO

REVISÓ

MTRA. ROSALIA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTORA DE LA DIVISIÓN DE CSH

DRA. SONIA PEREZ TOLEDO

PRESIDENTA

DRA. GRACIELA CARRILLO GONZALEZ

VOCAL

DRA. GEORGINA ALENKA GUZMAN CHAVEZ

VOCAL

DR. ALEJANDRO DAVILA FLORES

SECRETARIO

DR. ALEJANDRO JOSE LOPEZ FELDMAN