

**UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA**

**DIVISION DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES
AREA DE HISTORIA Y FILOSOFIA DE LA CIENCIA**

**NIVELES DE FUNCIONALIDAD EN LA TECNICA TRADICIONAL Y
CIENTIFICA; CASO DE LA MECANIZACION AGRICOLA**

TESIS DE MAESTRIA

Casa abierta al tiempo

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:
UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA**

MAESTRO EN HUMANIDADES (FILOSOFIA)

PRESENTA

ALVARO LLAMAS GONZALEZ

MEXICO, D.F., MAYO DE 1999.

**Este trabajo de tesis fue realizado bajo la asesoría del Mtro. José de Jesús
Silva Bautista, y aprobado por el siguiente**

JURADO EXAMINADOR:

Presidente: Mtro. Cuauhtémoc Lara Vargas

Secretario: Rubén Lara Piña

Vocal: José de Jesús Silva Bautista

ASESOR DE TESIS

José de Jesús Silva Bautista

Mtro. José de Jesús Silva Bautista



*QUEDO EN DEUDA Y PROFUNDAMENTE
AGRADECIDO:*



A la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, y a la División de Ciencias Sociales y Humanidades de la misma.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

A los maestros del jurado examinador Cuauhtémoc Lara Vargas, Rubén Lara Piña y José de Jesús Silva Bautista.

A los profesores Cuauhtémoc Lara Vargas, Francisco Javier Sánchez Pozos y Adolfo Olea Franco, por sus observaciones y aportaciones durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

A todos mis profesores de la maestría.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.





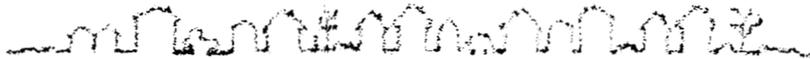
TRABAJO DE TESIS DEDICADO:

A mis padres Josefina González Montión y Zeferino Llamas
Pérez.

A mis hermanos: Irma, María de Jesús, Ismael, José María, José Ascención,
Zeferino, Leonel, Paula, Griselda y Edgar.

A mis compañeros de la maestría: Rebeca, Hilda, María Luisa, José de Jesús,
Ricardo, Héctor, Enrique, Alfonso y José Luis.

A Juanjo, Balo, Sergio y Fabricio.



A mi esposa Carmen.

A mi hijo Alejandro.



INDICE

	Pág.
Introducción	1
Objetivos	7
I Marco filosófico conceptual	8
I.1 Ciencia y técnica	8
I.2 Conocimiento científico y conocimiento técnico	11
I.3 Ciencia básica, ciencia aplicada, tecnología e ingeniería	15
I.4 Herramientas y máquinas	20
I.5 Niveles de funcionalidad en la técnica	22
II Técnica agrícola tradicional	25
II.1 Antecedentes de la técnica agrícola	27
II.2 Desde la aparición de la agricultura hasta el siglo XVIII	30
III Inicios de la mecanización agrícola; periodo de transición	43
IV La mecanización en la tecnología agrícola moderna	54
IV.1 Máquinas de vapor en la agricultura	54
IV.2 Desarrollo del tractor agrícola	58
IV.3 El paquete tecnológico de la agricultura científica	63
IV.4 La enseñanza universitaria de la ingeniería	65
IV.5 Los parámetros de funcionalidad de la tecnología agrícola moderna	70
IV.6 El método moderno de aplicación de las ciencias de la ingeniería; un caso particular en la mecanización agrícola	76
V Francis Bacon y la tecnología moderna	84
VI Ciencia y metodología de diseño en la ingeniería moderna	90
VI.1 El diseño en la ingeniería	90
VI.2 Identificación de una necesidad	92
VI.3 Definición del problema	92
VI.4 Investigación	93
VI.5 Generación de alternativas de solución	94
VI.6 Evaluación y selección	94
VI.7 Diseño preliminar	97
VI.7.1 Modelo matemático	99
VI.8 Construcción de un prototipo	115
VI.9 Diseño definitivo y especificación de la solución	117
VI.10 La optimización en el proceso de diseño	118
Conclusiones	121
Citas bibliográficas	125
Bibliografía consultada	131

INTRODUCCION

Dentro de los valores de la cultura occidental, la ciencia ocupa un lugar importante. Hay algo de respeto, y a la vez algo de recelo hacia la ciencia y sus manifestaciones. La influencia de la ciencia llega a prácticamente a todos los espacios de las sociedades industriales. La ciencia es uno de los aspectos más notables de la sociedad moderna, y su influencia llega a todos los niveles de la estructura social.

Para los fines de la filosofía de la ciencia, es indispensable un análisis detallado del papel de la ciencia en la sociedad, con vistas a reunir elementos de carácter empírico para entender mejor lo que la ciencia es, así como su papel y significado en el desarrollo material y espiritual del hombre, en tanto individuo y en tanto sociedad. Y es que la ciencia ha adquirido un papel central en la cultura del hombre moderno, y la cultura es esencial a la naturaleza del hombre. Comprender mejor el papel de la ciencia en el desarrollo material del hombre aportará elementos para conocer mejor la estructura misma de la ciencia. Por ello, la comprensión del aspecto práctico de la ciencia es tan importante como su aspecto intelectual; tan importantes son los conceptos y teorías científicas como el desarrollo material alcanzado gracias a la utilización práctica de la ciencia. Aún científicos tan destacados en las ciencias teóricas le han dado una importancia considerable al aspecto práctico de la ciencia, como Albert Einstein (1879-1955), quien afirmó que:

¿Qué situación ocupa el hombre científico en la sociedad? Está orgulloso de haber transformado, al menos indirectamente, la vida económica de los hombres mediante la eliminación del trabajo muscular. Por otro lado, le atormenta que sus logros experimentales hayan traído una amenaza para la humanidad, después de que estos frutos de la investigación cayeron en manos de los representantes del poder político.¹

El lugar que la ciencia tiene en la sociedad occidental contemporánea, se puede apreciar por su influencia en diversas áreas del quehacer humano, entre las cuales destacan algunas como el conocimiento científico acumulado, las cosmovisiones derivadas de las distintas corrientes filosóficas inspiradas directamente en el conocimiento científico y la capacidad adquirida para transformar el entorno humano, externo e incluso interno, a través de la tecnología.

Sin duda, hay otros espacios donde la ciencia se manifiesta, tanto a nivel general de la sociedad como del individuo en su vida cotidiana. Los casos mencionados son sin embargo representativos, aún cuando en particular, se podría objetar con razón, que la ciencia no afecta a todas las personas o grupos

sociales en la misma medida en cualquiera de los ámbitos antes planteados. Por ejemplo, la gran mayoría de la población no rige sus elecciones personales por el conocimiento científico disponible.

Con la tecnología la situación parece ser diferente. La tecnología, entendida a grandes rasgos como técnica con soporte científico, ha llegado prácticamente a todos los individuos de la sociedad, aunque desde luego, no en la misma proporción. Se podría decir que prácticamente todos los individuos o grupos sociales poseen, utilizan o dependen de algún tipo de artefactos tecnológicos, tales como medios de transporte, medios de comunicación, prendas de vestir, atención médica, alimentos procesados, herramientas de trabajo, instrumentos de medición, medios técnicos de diversión, etc. Para la mayoría de la población, instruida o no, la tecnología parece ser la manifestación más visible de la ciencia en la vida cotidiana, situación reconocida por autores importantes de la filosofía de la ciencia como Ernest Nagel, Bertrand Russell, John D. Bernal y Mario Bunge. Hoy las empresas organizan sus procesos productivos en torno a la innovación tecnológica sustentada en la ciencia. Conforme las tecnologías se vuelven más complejas, los procesos de innovación dependen cada vez más de los descubrimientos y la metodología de la ciencia. Esto ha influido para que la distinción entre ciencia y tecnología se vuelva cada vez más difusa. Es común hoy en día encontrar textos escritos por académicos en los cuales se confunden los términos “ciencia” y “tecnología”, o se manejan como inseparables. Se utiliza de manera cotidiana el término “ciencia y tecnología” para describir eventos científicos o tecnológicos indistintamente en los medios de comunicación electrónicos, así como en publicaciones escritas de divulgación científica y tecnológica. Ernest Nagel,² ha planteado que “los productos de la ciencia habitualmente más publicitados son, sin duda, las conquistas tecnológicas que han transformado las formas tradicionales de la economía humana a un ritmo acelerado”. Opiniones como ésta se encuentran entre algunos autores más de la filosofía de la ciencia y la filosofía de la técnica.

La técnica ha sido transformada por la incorporación del conocimiento científico al conocimiento técnico y práctico, acumulado y ordenado a lo largo de miles de años, sobre todo a partir de la revolución industrial en el siglo XIX, cuando el desarrollo de medios técnicos apoyados en conocimientos científicos y técnicos se intensificó. Mientras que la ciencia es un fenómeno reciente en la historia humana, a la técnica se le atribuye una antigüedad mucho mayor, quizás del orden de millones de años. La aplicación del conocimiento científico ha transformado las técnicas tradicionales en lo que hoy llamamos tecnología moderna. Así, hablar de tecnología implica hablar de ciencia dirigida hacia un fin práctico, es decir, de ciencia aplicada.

En las sociedades industriales contemporáneas, la tecnología está relacionada a la práctica real y cotidiana de la ciencia. Porque la ciencia, como planteó Russell,³ “además de conocimiento, es técnica, poder manipulador de las cosas, y de este aspecto ha arrancado la profunda influencia que ha mostrado en los últimos siglos”. En particular, en el siglo XX el hombre ha enfocado en gran medida su interés y su acción en el carácter utilitario de la ciencia, siendo la tecnología una muestra de ello.

El impacto de la tecnología en la sociedad, y en el individuo, es notable. Se podría decir que ha traído al hombre beneficios y daños. La humanidad ha estado ya al borde de su extinción por la aplicación de la ciencia al diseño y uso de armas, por el abuso en la explotación de los recursos naturales y del hombre mismo. En buena medida, las decisiones que dan rumbo a la economía, la educación y la política se basan en parámetros de tipo técnico, lo cual ha llevado a algunos autores a afirmar que se está haciendo a un lado al hombre como centro de atención fundamental, es decir, que el tecnicismo ha sido colocado por encima del humanismo como fin último de la acción humana. Para autores con este tipo de opiniones, la ciencia es percibida como una invasión a la intimidad humana, y la tecnología es el aspecto más visible de ello. La técnica, que en el ideal del humanismo renacentista era considerada como un medio para liberar al hombre de la naturaleza, para dominar al mundo según sus fines, hoy es percibida por muchos como opuesta al humanismo. La tecnocracia es para ellos un indicador de una “crisis humanista” de la sociedad actual.

Sin embargo, la historia parece mostrar elementos en el sentido de que el hombre de casi cualquier sociedad necesita de alguna forma de técnica para sobrevivir. La ciencia, a través de la tecnología, ha generado beneficios que el hombre común aprecia como indispensables. Por ejemplo, el ingreso per cápita de los países industrializados ha aumentado casi diez veces en los últimos dos siglos⁵, mientras que, medido el desarrollo científico y tecnológico en unidades de potencia, calor, voltaje, masa, etc., las tensiones, las vibraciones y el llamado progreso de la ciencia (y de la tecnología) fueron mil veces mayores en 1900 que en 1800.⁶ La capacidad de producción de alimentos hoy es mucho mayor que en la antigüedad, gracias a la aplicación de todo un paquete tecnológico basado en la aplicación de la ciencia en la solución de los problemas agrícolas. Este paquete tecnológico incluye factores como la generación de nuevas variedades de cultivos y animales, métodos químicos de fertilización, de control de plagas, malezas y enfermedades, así como la utilización de máquinas agrícolas.

Aún reconociendo que los beneficios de la ciencia a través de la tecnología no han llegado a todos los individuos y grupos sociales en la misma proporción, en promedio, en los países industrializados, la

tecnología ha contribuido a generar mayores expectativas de vida, menor mortalidad infantil, erradicación de ciertas enfermedades, un grado de educación más alto, medios de comunicación más rápidos, mejores condiciones de vida y de trabajo y mayores oportunidades de esparcimiento. Por ello, aquellos países han invertido de manera masiva en ciencia y tecnología, sobre todo a partir de la segunda guerra mundial. Los resultados, positivos y negativos, son notables.

El aspecto de la ciencia que se aborda en este trabajo es el que se refiere a su aplicación práctica, es decir, a la utilización de la ciencia para la solución de problemas prácticos del individuo o de la sociedad, o de algún grupo o sector de ésta.

Dada la gran vinculación actual entre ciencia y tecnología, a través del estudio de algunos aspectos internos de la tecnología es posible profundizar en el análisis y reflexión del aspecto pragmático de la ciencia. Este carácter práctico de la ciencia, relacionado con los asuntos cotidianos del hombre común, en general ha sido poco explorado dentro de los temas relevantes de la filosofía de la ciencia. Como asevera Tondl,⁶ los filósofos han prestado más atención a las “ciencias puras”, han subestimado a las “ciencias aplicadas”, y lo han hecho aún más con las “ciencias tecnológicas” (ciencias de la ingeniería).

Las ciencias de la ingeniería son ejemplos claros de la necesidad de conocer en más detalle el lado práctico de la ciencia dentro de los temas centrales de la filosofía de la ciencia. Aunque las ciencias puras no son ajenas a este contexto. La historia de la ciencia ilustra muchos ejemplos de investigaciones básicas que a la larga encontraron una aplicación práctica, pasando así a formar parte también de la práctica real y cotidiana de la ciencia en la sociedad, a través de la tecnología.

Para contribuir a entender con mayor detalle de qué manera la ciencia se ha incorporado a la técnica, y por tanto de qué manera la ciencia se vincula a la solución de problemas prácticos a través de la tecnología, en este trabajo se presenta el caso de la mecanización de las labores agrícolas, un campo particular de la ingeniería agrícola. Se recurre al concepto de funcionalidad, proveniente del ámbito interno de las ciencias de la ingeniería, que sirve para caracterizar el grado en el cual un producto técnico cumple la tarea o trabajo para el cual ha sido concebido y construido. Se muestra cómo la transición de las técnicas tradicionales o pre-científicas a la técnica científica o tecnología moderna, entre los siglos XVIII y XIX, estuvo vinculada a la aplicación de conocimientos y procedimientos científicos, para pasar de una funcionalidad mínima a un grado mayor de funcionalidad de los productos técnicos. Esto no significa que tal transición haya consistido únicamente de la aplicación de

la ciencia a la técnica tradicional, dado que, como se verá, la ciencia se pudo aplicar exitosamente a la solución de problemas técnicos sólo hasta que la técnica hubo alcanzado ciertos niveles de desarrollo.

Desde el siglo XVIII fueron incorporados a la industria y la agricultura una gran cantidad de innovaciones técnicas, dando lugar a la revolución industrial, pero sólo hasta finales del siglo XIX la ciencia se incorporó a la industria de manera sistemática, alcanzando su plena consolidación hasta el siglo XX. Para sustentar esta tesis se recurre a datos y ejemplos de las técnicas utilizadas en la mecanización de la agricultura, tanto tradicionales como científicas. Se presenta el análisis desde el punto de vista interno de las ciencias de la ingeniería, es decir, recurriendo más a conceptos de estas ciencias, por lo cual no se consideran los aspectos relativos al punto de vista de algún grupo o clase social en particular. En consecuencia, no se abordan los aspectos sociales, políticos o éticos de la técnica.

En el capítulo I se presentan los conceptos centrales en base a los cuales se desarrolla el análisis del problema planteado. Estos conceptos se sustentan en las posturas de diversos autores de filosofía de la ciencia y de la técnica. En los capítulos II, III y IV se muestran las diferencias entre las dos etapas de la técnica agrícola: la tradicional y la científica. Aunque se hace la ubicación histórica de estas dos etapas, el énfasis no se pone en el desarrollo cronológico de los artefactos agrícolas, sino en la diferenciación de estas dos etapas en base al tipo de conocimiento utilizado, mostrando que al incorporar los conocimientos y métodos de la ciencia al saber técnico tradicional, los niveles de funcionalidad de las máquinas se elevaron. Esto se advierte en la evolución de parámetros tales como la productividad agrícola, la potencia de las máquinas, la precisión alcanzada, la cantidad de horas-hombre para efectuar las labores, etc. La mayor parte del análisis se centra entre el siglo XIX y principios del XX, y en países como Inglaterra y Estados Unidos, debido a que en este periodo se acentúa la transición entre las técnicas tradicional y científica, y por ser éstas las naciones más representativas del desarrollo de la técnica agrícola en aquella época. Se muestra así que la utilización práctica de la ciencia en un campo particular de la producción, ha elevado como nunca la capacidad de trabajo del hombre, lo cual permite tener una idea más clara de cómo la ciencia ha sido benéfica para la satisfacción de las necesidades materiales del hombre, que en este caso corresponden a la procuración de los alimentos.

En el capítulo V se presenta una reseña de la influencia de Francis Bacon en la concepción moderna de la tecnología, ligada a la ciencia y a la satisfacción de las necesidades materiales del hombre. Se presenta a Bacon por ser uno de los principales fundadores de la ciencia moderna, ligada a la

observación de la naturaleza y la experimentación, surgida sobre todo a partir del siglo XVII. Esta ciencia moderna, decía Bacon, debería estar encaminada a resolver los problemas materiales del hombre, para lo cual debería vincularse a la técnica, tal como hoy ocurre en la tecnología moderna. Bacon influyó para que generaciones posteriores de científicos se vincularan a la solución de problemas prácticos, y en este capítulo se muestra de qué manera ejerció tal influencia.

Finalmente, en el capítulo VI se muestra una de las principales formas en que las ciencias de la ingeniería incorporan hoy sistemáticamente la ciencia a la solución de problemas prácticos. Se presenta la metodología de diseño en la ingeniería, el procedimiento a través del cual se establecen las características de los artefactos que representan la solución de los problemas técnicos. En particular, se muestra de qué manera, al hacer uso de modelos matemáticos, se recurre a los fundamentos de las ciencias de la ingeniería y las matemáticas como auxiliares en la solución de este tipo de problemas.

En este trabajo no se pretende hacer una apología de la tecnología, ni se defiende la postura utópica de que la ciencia y la tecnología representan la solución de todos los problemas del hombre. En cambio, se expone que, con sus limitaciones e inconvenientes, la ciencia ha contribuido a generar expectativas de niveles de vida que no se tenían con los medios de la técnica tradicional. La ciencia tiene hoy una utilidad práctica que debe ser mejor entendida y valorada. El aspecto práctico de la ciencia es tan importante como el intelectual. Los alimentos, la medicina, la salud, la educación y demás aportes materiales de la ciencia son tan importantes como las teorías científicas y la estructura del conocimiento científico. Por ello, la reflexión sobre los asuntos que involucran tanto a la ciencia como a la técnica es importante para entender mejor el aspecto práctico de la ciencia. Este trabajo pretende ser una contribución en este sentido.

OBJETIVOS

Dada la fuerte vinculación práctica actual entre la ciencia y la tecnología, existen algunos aspectos de la ciencia que también son objeto de estudio de la filosofía de la técnica. El tema de este trabajo es uno de estos casos. El paso de las técnicas agrícolas tradicionales a las tecnologías agrícolas se describe utilizando conceptos que, en la filosofía de la técnica, son parte de las ciencias de la ingeniería, es decir, son *internos* a los sistemas técnicos. Estos conceptos centrales son la funcionalidad y el diseño. Por esta razón, no se hace alusión en este trabajo a implicaciones o consecuencias sociales, políticas o culturales, puesto que éstas pertenecen al entorno externo de los sistemas técnicos. Bajo estas consideraciones, se definen los objetivos de este trabajo de la siguiente manera:

Tema general

El tema general que aborda este trabajo de tesis, para ubicarlo dentro del ámbito de la filosofía de la ciencia, es el aspecto práctico de la ciencia, las ciencias aplicadas a la solución de problemas prácticos del hombre.

Objetivos particulares

- 1) Aportar elementos en el sentido de que, uno de los resultados de la incorporación del conocimiento científico al conocimiento técnico, sobre todo a partir del siglo XIX, fue el aumento en el grado de funcionalidad de los medios técnicos, es decir, la búsqueda sistemática de la optimización en la técnica.

- 2) Mostrar de qué manera la utilización del conocimiento científico en la técnica se ha institucionalizado a través de la metodología de diseño en la ingeniería. Al ser la metodología de diseño la herramienta metodológica más importante con que cuenta el ingeniero para el desarrollo de nuevas tecnologías, la inserción del conocimiento científico en esta metodología garantiza su utilización cotidiana en la solución de los problemas de la ingeniería.

Para aportar elementos de apoyo a estos argumentos, se ha seleccionado un campo particular de la técnica: la técnica agrícola, de la cual se presentan elementos de carácter conceptual, histórico y metodológico.

I. MARCO FILOSOFICO CONCEPTUAL

Dado que el tema central de este análisis se ubica entre los campos de la filosofía de la ciencia y la filosofía de la técnica, se hace necesario partir de un marco conceptual que tome elementos de ambos. Por ello, en este apartado, se aclara el significado de algunos términos que se consideran básicos para la asimilación de las ideas, argumentos y conclusiones que se irán desarrollando en este trabajo. Se propone también desde aquí el sentido deliberado que se asigna a algunos conceptos, en concordancia con la orientación requerida para dar coherencia al análisis del problema aquí planteado, sin que ello signifique pasar por alto las posturas de autores destacados en los campos filosóficos que se abordan.

I.1. Ciencia y técnica

Los conceptos de ciencia y técnica en la filosofía, a pesar de la diversidad de posturas, ilustran claramente dos aspectos relevantes para los propósitos de este trabajo: 1) El papel central que la ciencia y la técnica desempeñan en la sociedad industrial contemporánea, y 2) la profunda relación que existe entre ambas. En esta sección se examina la relación que existe entre ciencia y técnica, a la luz de las reflexiones de diversos autores desde la filosofía de la ciencia y la filosofía de la técnica, con lo cual se pone de manifiesto que la relación entre ciencia y técnica es un tema que se ha abordado desde ambos campos del conocimiento filosófico.

En lo que a la ciencia se refiere, Russell⁷ la definió como

Un intento por descubrir, por medio de la observación y el razonamiento basado en la observación, los hechos particulares acerca del mundo primero, luego las leyes que conectan los hechos entre sí, y que hacen posible predecir los sucesos futuros. Relacionada con el aspecto teórico de la ciencia está su técnica, que utiliza el saber científico para producir comodidades y lujos que eran imposibles, o al menos mucho más costosos en la era precientífica.

Y recalca Russell que es precisamente el último aspecto el que confiere a la ciencia su importancia y prestigio, aún para quienes no son científicos.

John D. Bernal⁸ argumentó que, dada la complejidad y desarrollo histórico de la ciencia, su definición es casi imposible, pero planteó que puede ser considerada, según el contexto de interés, como una institución, un método, una tradición acumulada de conocimiento, un factor principal de la producción,

o una cosmovisión, entre otras opciones. La penúltima de estas posibilidades deja implícita la idea de relación directa y esencial entre ciencia y técnica. Más aún, Bernal añadió que no es casual que las formulaciones intelectuales de la ciencia se hayan desarrollado y florecido al mismo tiempo y en los mismos sitios donde se produjeron los cambios técnicos que sustentan la actual civilización industrial.

Mario Bunge⁹ ha elaborado un inventario de las principales características de la ciencia, entre las cuales cabe aquí destacar que es útil, porque provee herramientas para el bien y para el mal, además de que los científicos, según él, no pueden dejar de producir conocimientos aplicables. Bunge va más allá y asevera que la técnica moderna, también llamada tecnología, es en medida creciente ciencia aplicada. De manera análoga Wartofsky¹⁰ considera que la ciencia es estructura y función, donde la primera comprende el conjunto organizado y sistemático de conocimientos, conceptos, leyes, teorías, métodos, etc. La función se refiere a los modos de actuar y los procedimientos de la ciencia con respecto a los fines y propósitos que persigue. Si consideramos los fines a los cuales está atada la ciencia en la moderna sociedad industrial, es fácil vincularla a la técnica. Y los filósofos marxistas hacen explícita la vinculación entre ciencia y producción material, argumentando que el nacimiento y desarrollo de la ciencia viene condicionado por las exigencias de la producción material y el desarrollo de la sociedad.¹¹ La ciencia se concibe entonces como una fuerza productiva y no como especulación puramente intelectual y desinteresada, vinculada en su esencia a fines prácticos, a la transformación del medio ambiente y del hombre, y por tanto a la técnica, tal como se apreciará más adelante cuando queden claras las definiciones de técnica.

En cuanto a la concepción de la técnica, se percibe que la mayoría de los autores en la filosofía de la técnica coinciden en los siguientes aspectos:

- 1) La técnica es muy anterior a la ciencia en cuanto a su aparición temporal. Mientras que la ciencia moderna surge apenas en el siglo XVII, la técnica ha acompañado quizás a algunos antecesores del *homo sapiens*.
- 2) La técnica moderna, o tecnología, no puede ser concebida simplemente como ciencia aplicada, aún cuando se reconoce la creciente vinculación entre ciencia y técnica moderna.

En lo que respecta al primer punto, desde los tiempos de Aristóteles se reconoce este hecho. Aristóteles¹² manifestó al respecto que:

Si los primeros filósofos filosofaron para librarse de la ignorancia, es evidente que se consagraron a la ciencia para saber, y no por miras de utilidad. El hecho mismo lo prueba, puesto que casi todas las áreas que tienen

relación con las necesidades, con el bienestar y los placeres de la vida, eran ya conocidas cuando se comenzaron las indagaciones y las explicaciones de este género.

En cuanto al segundo punto, la tecnología es más que simple ciencia aplicada, tal como se pone de manifiesto en el caso particular desarrollado en este trabajo, donde se muestra la relación entre el desarrollo de la técnica agrícola y la ciencia a partir del siglo XVIII.

Al parecer, existe una mayor discordancia entre las diversas definiciones de la técnica que en el caso de la ciencia. Las definiciones de la técnica son más numerosas y variadas que las de la ciencia. En este trabajo se asume la definición que plantea Rapp,¹³ para quien técnica es

el concepto de todos los objetos, procedimientos y sistemas que, sobre la base de la construcción creadora, son fabricados para la satisfacción de necesidades individuales o sociales, y que a través de funciones definibles sirven a determinados fines y que tienen en su totalidad un efecto de transformación del mundo.

Los objetos concretos fabricados, tales como un automóvil, un tractor o una computadora, se denominan artefactos. El concepto de artefacto se detalla en la sección I.3.

Esta definición está ligada a la práctica real y cotidiana de la técnica, a la problemática y esfera de actividad del técnico (hoy ingeniero, en la técnica científica). Esta definición se considera aquí adecuada porque es compatible con lo que fue la técnica antes de la era científica, y con la que es hoy la técnica moderna, atada a la ciencia. La transición de la primera a la segunda etapa comenzó en el siglo XVIII. A partir del siglo XIX con la revolución industrial, la técnica, hasta entonces sustentada en la tradición artesanal, se une sistemáticamente a la ciencia natural matemática, dando lugar a un proceso de desarrollo técnico-científico que hasta hoy continúa acelerándose, como lo ha planteado Rapp.¹⁴ En la sección I.3 se detalla la vinculación de la técnica con la ciencia en la actualidad, dando lugar a la técnica científica, denominada también como tecnología. Así, la tecnología es la etapa actual, científica, de la técnica.

A partir del debate existente acerca de la neutralidad de la ciencia y la técnica, se deriva una discusión que permite apreciar algunos aspectos de la relación entre ciencia y tecnología, y con ello, sobre la naturaleza práctica de la ciencia. Por ejemplo, Capanna¹⁵ advierte que no es posible entender la tecnología como aplicación práctica de principios develados por una ciencia de por sí desinteresada, puesto que la ciencia moderna nunca fue desinteresada. Tanto la ciencia como la técnica, sostiene Capanna, proceden de una misma voluntad de apropiación y dominio de la naturaleza. Ellui¹⁶ va aún más

lejos al postular que hoy, en la sociedad industrial, la ciencia ha sido rebasada por la técnica. Dado que las técnicas se desarrollan a ritmos cada vez más vertiginosos, exigen un desarrollo paralelo de la ciencia, con lo cual ésta queda reducida a un medio y un elemento de la técnica. Y los científicos modernos, según Ellul, son incapaces de realizar investigaciones científicas sin grandes cantidades de dinero, hombres y grandes laboratorios. El trabajo en tales laboratorios no es trabajo científico, sino técnico, y el dinero invertido condiciona toda investigación científica a una aplicación práctica que ha incrementado considerablemente el utilitarismo científico, a tal grado que las investigaciones desinteresadas son verdaderamente raras. Aunque para muchos la postura de Ellul es exagerada, no se puede negar que representa una opinión que invita a reflexionar sobre la complejidad de la relación entre ciencia y técnica, y con ello, sobre el papel de la ciencia en la vida cotidiana de un número cada vez mayor de personas y grupos sociales.

Como puede ya advertirse, la discusión sobre la relación entre ciencia y tecnología en la realidad, aporta elementos de carácter empírico para ampliar la comprensión de la ciencia, puesto que reflexiones como las de Capanna y Ellul ponen en duda el pretendido carácter desinteresado de la ciencia. Conforme se vaya avanzando en este trabajo, aparecerán más elementos para enriquecer la reflexión sobre el carácter práctico de la ciencia, apoyado en la evidencia histórica.

I.2. Conocimiento científico y conocimiento técnico

La ciencia y la técnica modernas están hoy vinculadas, tal como se planteó en la sección anterior. Sin embargo es necesario dejar claro que existe una distinción fundamental entre el conocimiento que se genera en la actividad científica y el conocimiento que sustenta a la técnica.

Plantea Rapp¹⁷ que, desde el punto de vista del actuar eficiente y funcional, la técnica comprende dos aspectos:

- 1) El conocimiento del procedimiento que hay que seguir, y
- 2) Su realización efectiva, es decir, todos los objetos vinculados con estos procedimientos, tales como instrumentos, máquinas, etc.

Desde el contexto del primer aspecto, la técnica puede considerarse como un tipo especial de conocimiento, diferente al conocimiento científico, aunque cada vez el vínculo entre ambos es más estrecho en la actualidad.

Las ciencias y las técnicas, junto con las humanidades, son algunos de los campos de conocimientos que el hombre ha estructurado, entendiendo como un campo de conocimientos a un sector de la actividad humana dirigido a obtener, difundir o utilizar conocimiento de alguna clase, sea verdadero o falso, según la definición de Bunge.¹⁸ Esta definición nos es útil porque permite apreciar las similitudes y las diferencias entre el conocimiento científico y el conocimiento técnico, tal como se entienden para los fines de este análisis. Es importante que esta caracterización sea explícita, pues de esta manera adquieren coherencia los argumentos relativos sobre todo al desarrollo histórico de la técnica que aquí se presentan. La diferenciación asumida entre conocimiento científico y técnico permitirá apreciar la diferenciación entre técnica tradicional y científica que aquí se presenta. Y es que, siguiendo con la conceptualización de Bunge, un campo de conocimientos puede alcanzar o buscar una meta, un propósito, como por ejemplo la verdad, el poder, la utilidad o la persuasión, por mencionar algunos. Es precisamente la diferencia de propósitos entre estos dos campos el aspecto sobre el cual se pone más énfasis. La meta más importante del conocimiento científico es la explicación, mientras que la del conocimiento técnico es la utilidad práctica.

El conocimiento científico al que aquí se hace referencia, a menos que se indicara lo contrario, se refiere específicamente a aquel que se obtiene en las ciencias naturales, por ser éstas las ciencias que se vinculan fuertemente al desarrollo de la técnica a partir del siglo XIX, y en particular a la técnica agrícola. Por conocimiento científico se entenderá al conocimiento que subyace en la ciencia natural moderna, el modelo de ciencia moderna que, teniendo sus orígenes en la Grecia Antigua, se configura en la forma actual a partir del renacimiento, con la aportación de Bacon, Descartes y Galileo entre otros que formaron parte de la llamada revolución científica del siglo XVII.

El conocimiento científico, en los términos antes convenidos, se origina en Grecia, con Aristóteles como figura central. Desde entonces, su propósito ha sido y sigue siendo la búsqueda de los principios explicativos de las cosas, es decir, la explicación, el porqué de las cosas. Con Aristóteles y algunas otras figuras de la Grecia Antigua, el conocimiento empírico acumulado es sometido al análisis racional. Se dan los primeros intentos de establecer relaciones causales entre los hechos (las *causas últimas* de

Aristóteles), y se logra convertir las reglas empíricas para la agrimensura en la ciencia deductiva de la geometría, destacando Tales de Mileto, Pitágoras y Euclides, éste último el culminador de la obra. Como características de esta forma inicial del conocimiento científico desarrollado por los griegos se destacan su carácter racional y deductivo, teniendo como base la lógica formal de Aristóteles. La observación de los hechos como la inducción para establecer principios universales, fue practicada casi exclusivamente en las ciencias biológicas por Aristóteles. Sin embargo, la racionalidad y el método inductivo fueron los atributos de la Antigüedad.

El conocimiento científico moderno tomó su forma actual en el Renacimiento.¹⁹ La observación y la experimentación se constituyen en el punto de partida y en el criterio básico para generar el conocimiento capaz de explicar racionalmente los sucesos naturales. Ahora este tipo de conocimiento parte de hechos empíricos y no de premisas de autoridad, como se hacía en el escolasticismo medieval, donde estas premisas de autoridad provenían de las Escrituras de la Iglesia y de las obras de Platón y Aristóteles principalmente. Roger Bacon y otros pensadores en menor grado contribuyeron a articular al conocimiento científico en base a la observación y la experimentación, además de reforzar el papel del método inductivo para el establecimiento de generalizaciones. Con Kepler (1571-1630) y Galileo (1564–1642) el conocimiento científico adquirió el carácter cuantitativo propio de la ciencia moderna como hoy se practica. Desde entonces, las relaciones causales entre los hechos se buscan expresar en la forma de relaciones matemáticas. El conocimiento científico es ahora estructurado en base a conceptos matemáticos muy concretos, en lugar de las “vagas categorías teológicas” propias del escolasticismo. La explicación científica se enfoca desde entonces hacia campos más concretos y específicos de la naturaleza, y no a la búsqueda de las causas últimas de las cosas que pretendían Aristóteles y los escolásticos.

En suma, por conocimiento científico se entiende aquí al campo de conocimiento cuyo propósito principal es la búsqueda de la explicación de los hechos o eventos, para lo cual se recurre a la observación y la experimentación, para obtener por inducción y deducción una elaboración racional de conceptos que reflejen la riqueza de las diversas interrelaciones, causalidades y dependencias entre las partes constitutivas de un objeto de estudio. Estas interrelaciones, causalidades y dependencias, siempre que es posible, son expresadas en términos cuantitativos. El primer ejemplo notable de síntesis de conocimiento científico en estos términos fue la que Newton hizo con la mecánica, en el siglo XVII.

Por su parte, el conocimiento técnico tradicional, ligado a la técnica, es el llamado “saber práctico”, o saber técnico, entendido como el conocimiento acerca de cómo hay que hacer las cosas, cómo se alcanzan objetivos prácticos, y cómo hay que actuar en situaciones concretas. En otras palabras, es el conocimiento de la experiencia práctica y su generalización bajo la forma de reglas de la creación técnica.²⁰ La producción artesanal, anterior y antecedente de la producción industrial, se sustentó en el conocimiento técnico tradicional disponible, el cual es fruto de toda la experiencia adquirida por la actividad manual y cotidiana del hombre. Este conocimiento fue obtenido muy lentamente y cotidianamente, y es diferente al conocimiento científico no sólo por su propósito, sino por su estructura misma. Se trata de un conocimiento que no está estructurado en base a una elaboración racional y sistemática de conceptos (caso del conocimiento científico), sino sobre todo en base a reglas para la acción práctica o como simple reunión de conocimientos aislados. Así, el propósito es la utilidad práctica. Este conocimiento se obtiene a partir de las experiencias derivadas de la acción cotidiana, del trabajo diario, y consiste, en una serie de procedimientos definidos prácticamente que dan resultados útiles.²¹ Estos conocimientos son transmitidos de unas generaciones a otras mediante explicaciones verbales y, sobre todo, mediante la imitación manual y práctica.

Entendido de esta manera, el conocimiento técnico tradicional es el saber en el cual descansa el trabajo manual, y que es la base de los logros de la técnica hasta el siglo XVIII y parte del XIX. Las reglas y datos en el saber técnico tradicional se reducen más bien a constatar y describir los hechos de interés. Los conocimientos científicos en cambio, como lo explica Kedrov,²² además de constatar y describir los hechos, buscan la explicación (racional) de los mismos dentro del contexto de un sistema de conceptos estructurados de manera lógica en teorías, leyes, etc.

Fueron estos dos tipos de conocimiento (el científico y el técnico tradicional) los que evolucionaron por separado, sólo con ocasionales coincidencias, hasta el siglo XVIII, cuando el conocimiento técnico tradicional comienza a hacer uso sistemático del conocimiento científico para resolver los nuevos problemas prácticos, derivados de las necesidades de la industria, dando origen a la tecnología moderna, la cual hace uso tanto de la ciencia como de la experiencia práctica acumulada en la técnica tradicional. Con la vinculación entre ciencia moderna natural y el saber técnico tradicional nace la ingeniería.

I.3. Ciencia básica, ciencia aplicada, tecnología e ingeniería

El aspecto práctico de la ciencia, a la luz del esquema conceptual que aquí se asume, se manifiesta hoy a dos niveles o en dos campos de conocimiento: al nivel de la tecnología y al nivel de la ciencia misma, dentro de las ciencias aplicadas. Para ello se asume la clasificación de las ciencias en ciencias básicas y aplicadas. Para que no haya la confusión frecuente entre ciencias aplicadas y tecnología, a continuación se aclaran estos conceptos, para lo cual, una vez más se toma como referencia el propósito de estos campos de investigación, aunque ahora el objeto de estudio también adquiere relevancia.

Como plantea Bunge, la distinción entre ciencia básica, ciencia aplicada y técnica (en particular la tecnología) es un problema típico de la filosofía de la ciencia y de la técnica.²³ Aunque para muchos la distinción entre ciencia pura y aplicada no tiene sentido, para los fines de este trabajo la diferencia es importante, dado que se explora el lado práctico de la ciencia.

De acuerdo a Leff,²⁴ se entiende por ciencia básica o pura, sea teórica o experimental, a la parte de la ciencia, o a las ciencias particulares cuyo propósito central es la construcción de estructuras conceptuales que hacen posible la comprensión científica del mundo. La función de las ciencias básicas es entonces profundizar en el conocimiento para explicar, para entender las cosas, sin pretensiones explícitas, al menos en primera instancia, de aplicar el conocimiento para resolver problemas prácticos. Por ello, es frecuente que en las ciencias teóricas particulares, como la física o las matemáticas puras, se elaboren teorías científicas antes de que exista conciencia o demanda en la sociedad sobre sus posibles aplicaciones o implicaciones prácticas. Hasta antes del siglo XIX, prácticamente todas las ciencias existentes eran teóricas, dado que, como se apreciará en los capítulos II y III, la ciencia conocida permaneció ajena a los problemas prácticos hasta el siglo XIX, cuando se mezcla con el conocimiento técnico tradicional.

Las ciencias aplicadas se diferencian de las ciencias teóricas en que su propósito no es la comprensión de la estructura fundamental del mundo, sino el estudio o comprensión de las propiedades de los recursos *potencialmente utilizables* en la solución de problemas prácticos.²⁵ Las llamadas ciencias de la ingeniería son ejemplos de ciencias aplicadas, tales como la mecánica de sólidos, la mecánica de fluidos, la electrónica y la estadística. Así, la comprensión científica de los procesos que subyacen en los procedimientos de la técnica moderna (el *know how* o *saber cómo*), es el tema de estudio de las ciencias

aplicadas. El *saber cómo* es a las ciencias aplicadas lo que el *saber porqué* es a las ciencias teóricas. Por ejemplo, la mecánica de sólidos estudia a las fuerzas y sus efectos en los materiales y formas geométricas, pero no para entender el concepto esencial de fuerzas, materia y forma, sino para poder diseñar a las máquinas y sus componentes de manera óptima.

El método de las ciencias básicas y aplicadas es el mismo, sólo difieren en su propósito. Bunge,²⁶ explica esta situación de la siguiente manera:

Tanto la investigación básica como la aplicada utilizan el método científico para obtener nuevos conocimientos (datos, hipótesis, teorías, técnicas de cálculo o de medición, etc.). Pero mientras el investigador básico trabaja en los problemas que le interesan (por motivos puramente cognoscitivos), el investigador aplicado estudia solamente problemas de posible interés social.

La tecnología es una mezcla de ciencia y saber práctico, que constituyen así un campo de conocimiento cuyo propósito es la *transformación* de los recursos naturales en artefactos. El propósito principal es la acción práctica, con miras a obtener una utilidad y no tanto la comprensión en sí misma. La transformación de los recursos naturales se lleva a cabo en la tecnología a través de la investigación, diseño y planeación mediante la utilización de conocimientos empíricos y científicos para controlar cosas o procesos naturales, diseñar artefactos o procesos. Un artefacto es un objeto artificial, el cual se diferencia de un objeto natural en que ha sido diseñado, y todo diseño lo es de un artefacto.²⁷ Por artificial se entiende toda cosa, estado o proceso controlado o construido deliberadamente con ayuda de algún conocimiento aprendido, y utilizable por otros. Todo lo artificial es resultado del trabajo humano. Y todo artefacto está formado físicamente a partir de materiales tomados de la naturaleza por el hombre. Algunos artefactos son instrumentos de trabajo, mientras que otros comprenden dispositivos cuya función es desempeñar el papel de medios para alcanzar objetivos no productivos, tales como medios de confort, ocio, distracción, estéticos, etc. Esto es así porque la utilidad no se refiere exclusivamente a procesos productivos, sino también a propósitos no productivos, ligados a objetivos prácticos como los antes mencionados. En este trabajo, la referencia a artefactos se refiere exclusivamente a instrumentos o medios de trabajo, dada la naturaleza del tema de análisis: los procesos de producción agrícola. Se hablará de medios técnicos y dispositivos técnicos como sinónimos de artefactos.

Por diseño se entenderá la representación anticipada de un objeto artificial con ayuda de algún conocimiento científico. El concepto de diseño, también entendido como proyecto tecnológico, se desarrolla con amplitud en el capítulo V, en donde se explica en detalle todas las etapas sucesivas que son requeridas para el diseño específico de algún artefacto.

La tecnología moderna o técnica científica, a diferencia de la técnica tradicional, hace uso de todo un conjunto de teorías y métodos lógicos y matemáticos actualizados, así como datos, e hipótesis que Bunge califica como “razonablemente bien confirmadas” para indicar el carácter objetivo y racional de estas herramientas conceptuales, provenientes sobre todo de las ciencias naturales y de las ciencias de la ingeniería. El conocimiento objetivo que subyace en estas herramientas conceptuales es un medio y no un fin en sí mismo para la tecnología, pues interesa sólo en la medida en que es útil para el diseño, operación o mantenimiento de alguna clase de artefacto. La estrecha relación entre ciencia y tecnología es caracterizada por Bunge como un ciclo del conocimiento, que consiste en que la tecnología moderna consume ciencia, al mismo tiempo que la ciencia depende los avances tecnológicos, y de este ciclo, depende ya la continuación de la sociedad industrial, la cual es *altamente científica*.²⁸

Se utilizarán los términos técnica científica y tecnología moderna, o simplemente tecnología como sinónimos, para diferenciarlos de la técnica tradicional o pre-científica. Estas designaciones son acordes a la terminología que utilizan autores como Daumas, Ellul, Rapp y otros que han contribuido al desarrollo de la historia y la filosofía de la técnica, o que habiendo desarrollado su trabajo para la historia y la filosofía de la ciencia, han abordado las cuestiones de la técnica, tales como Bunge, Russell y Bernal; todos ellos consultados para conformar el marco conceptual de este trabajo. Como ejemplos de artefactos en la técnica pre-científica en la agricultura son algunas herramientas para la cosecha de cereales como la hoz, y para aplastar los granos como la muela o el mazo, ubicados en los inicios mismos de la agricultura, a comienzos del VII milenio a. C., el arado de madera del IV milenio a. C. y el molino de viento en el siglo XII. La técnica científica agrícola ha producido en el siglo XX una gran variedad de máquinas e implementos para labranza, siembra, cosecha, control de plagas y malezas, etc. El tractor agrícola es probablemente el producto tecnológico para la agricultura más importante del siglo XX.

Hasta antes del siglo XIX, las ciencias teóricas y las técnicas tradicionales se desarrollaron paralelamente y, salvo excepciones, ajenas entre sí. La revolución industrial creó un contexto que favoreció la vinculación entre ambas. Cuando se conjuntaron la ciencia teórica conocida y la técnica tradicional disponible en torno a propósitos comunes, ambas sufrieron transformaciones en la estructura interna del conocimiento respectivo. De la técnica tradicional surgió la tecnología moderna, caracterizada por la incorporación del conocimiento científico al conocimiento técnico, y la ciencia por su parte dejó de ser casi exclusivamente teórica, puesto que se desarrollaron una amplia gama de ciencias aplicadas. Desde

entonces, estas transformaciones a su vez propiciaron que la vinculación entre ciencia y tecnología se vuelva cada vez más estrecha, en un proceso que continúa aún en nuestros días, y a tal grado que los términos “ciencia” y “tecnología” aparecen hoy frecuentemente como inseparables en la literatura científica y técnica, e incluso llegan a confundirse.

En la técnica, sea tradicional o científica, el conocimiento involucrado en los procedimientos para la elaboración y operación de los artefactos es un factor muy importante, y es el que más interesa desarrollar en este trabajo. En la técnica tradicional este conocimiento es empírico. En la técnica tecnología moderna, este conocimiento es, como ya se dijo, una mezcla de saber práctico y conocimiento científico. El conocimiento científico involucrado en la tecnología está sistematizado en un conjunto de ciencias aplicadas, denominadas como ciencias de la ingeniería o ciencias técnicas, como se les reconoce dentro de la literatura técnica.

Se entiende por ingeniería²⁹ el conjunto de conocimientos y técnicas que permiten aplicar el saber científico a la utilización de la materia y de las fuentes de energía, mediante invenciones o construcciones útiles para el hombre. La tecnología moderna debe su desarrollo en buena medida al desarrollo de las ciencias de la ingeniería y a las ciencias naturales. Ejemplos de ciencias de la ingeniería son la ciencia de materiales, la resistencia de materiales, la electrotecnia y la electrónica. El saber práctico por otro lado, está contenido en un conjunto de disciplinas técnicas. De este modo, la ingeniería comprende el conocimiento sistematizado de la tecnología, tanto científico como empírico. La ingeniería está así relacionada con la formación profesional y especializada de quienes hacen y operan la tecnología. La tecnología está entonces a cargo de los ingenieros. Por ejemplo, la tecnología agrícola está a cargo o es asunto de los ingenieros agrícolas, así como la tecnología del transporte está a cargo de ingenieros mecánicos, navales, aeronáuticos, etc. Se podría resumir la relación entre ingeniería y tecnología diciendo que la tecnología es el objeto de estudio de la ingeniería, la cual está fuertemente sustentada en el conjunto de conocimientos científicos agrupados en las ciencias de la ingeniería.

La ingeniería agrícola³⁰ es la aplicación de los principios de la ingeniería a los sistemas biológicos asociados con la producción de alimentos, es decir, la producción agrícola. La mecanización agrícola, que es el aspecto sobre el cual se centra este trabajo, es una parte del objeto de estudio de la ingeniería agrícola en la actualidad. La mecanización puede definirse de manera general como el proceso de interponer potencia y máquinas entre el hombre y los materiales.³¹ En la agricultura, algunos de estos

materiales son el suelo, semillas, alimentos, fertilizantes, forrajes y animales. La mecanización no es simplemente el uso de herramientas, o el manejo de animales en las labores agrícolas. En lugar de ello, la mecanización implica el reemplazo del hombre y sus herramientas manuales por máquinas. La mecanización agrícola, como se verá en el capítulo III, data apenas de finales del siglo XVIII, mientras que el uso de herramientas agrícolas de tracción animal se remonta hasta 3 000 años a. C. con los antiguos egipcios.

Según Rapp,³² desde el punto de vista de la metodología de la ciencia, el surgimiento de las ciencias de la ingeniería, a las cuales la tecnología moderna debe su alta capacidad de rendimiento, se debió a tres fuentes:

- 1) A un proceso de obtención de datos sistemáticamente ordenados y probados empíricamente acerca de los procedimientos de los sistemas técnicos. Con ello se transita de la transmisión oral, típica de la tradición artesanal, al registro escrito de los datos.
- 2) A la separación del conocimiento técnico del resto del saber. Con ello, nacen verdaderas especialidades técnicas, antecesoras de las actuales ciencias de la ingeniería. El conocimiento técnico se convierte en un campo independiente del saber.
- 3) A la vinculación entre el saber técnico (artesanal, netamente empírico) y la habilidad técnica con el método matemático-científico natural, es decir, el método científico desarrollado en las ciencias naturales.

Esta relación entre técnica y ciencias naturales se torna recíproca y habitual en el siglo XIX. Esta relación recíproca se desarrolla de manera natural, debido a que, por un lado, la moderna ciencia natural se fundamenta en gran medida en un carácter experimental. La ciencia natural necesita de la experimentación, por lo cual se vuelve dependiente de medios técnicos. Por otra parte, la nueva técnica se vuelve usuaria de los resultados de la investigación científica para su aplicación práctica, por lo cual la técnica se vuelve técnica científica. La tecnología deja de basarse sólo en reglas empíricas aisladas, basadas sólo en la experiencia, como lo hacía en la antigua tradición artesanal. En lugar de ello se desarrolla una amplia elaboración teórica basada en los métodos matemáticos y resultados de la investigación científico-natural, reforzada por investigaciones experimentales sistemáticas. Nacen así las modernas ciencias de la ingeniería.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, es posible entonces separar al desarrollo de la técnica en dos grandes etapas: antes de la aparición de las ciencias de la ingeniería, y después de ese suceso. Esta división corresponde a la técnica tradicional, o técnica pre-científica, y a la técnica científica o tecnología.

I.4. Herramientas y máquinas

Los conceptos de herramienta y máquina son importantes porque representan, en general, las dos etapas de la técnica que se presentan en este análisis. En lo que a artefactos se refiere, éstos son caracterizados por Marx³³ en dos categorías que históricamente se ubican en dos periodos: las herramientas o utensilios, que son los artefactos propios de la era pre-industrial o artesanal, y las máquinas, que son los artefactos que predominan en la época industrial. La división que Marx hace de la técnica en eras artesanal e industrial corresponde a los conceptos que aquí se emplean de técnica tradicional y técnica científica respectivamente, puesto que la división temporal en ambos casos corresponde a antes y después de la revolución industrial, ya que para Marx la técnica experimentó una verdadera revolución. De esta manera, a grandes rasgos, lo que aquí se considera como transición de la técnica tradicional a la era tecnológica, para Marx es la transición de la producción artesanal a la maquinización de los procesos productivos.

Para Marx, una herramienta, que es sinónimo de instrumento y utensilio, es un artefacto en el cual el hombre es tanto la fuerza motriz como el operador del mismo. Que el hombre sea la fuerza motriz significa que la energía para elaborar u operar el artefacto proviene exclusivamente de la fuerza muscular humana. Que el hombre sea el operador significa que la realización de la tarea o función para la cual ha sido elaborado el artefacto es resultado de la manipulación humana. El que una herramienta sea útil para alguna función es producto de la habilidad del hombre para su manejo, su utilización, su manipulación. Por esta razón, en la realización de alguna tarea mediante herramientas, Marx plantea que “la mano corrige aquí, más que otra cosa, los errores del instrumento”.³⁴ Por ejemplo, una pala, un cuchillo y una coa son ejemplos de herramientas. Para cavar con una pala, el hombre utiliza su fuerza muscular para poner en movimiento a esta herramienta, y de su destreza personal para manipularla depende que haga bien o mal la tarea de cavar. Lo mismo se puede decir para el cuchillo y la coa, cuyas tareas son cortar y remover la tierra respectivamente.

Una máquina es un artefacto en el cual el hombre ya no es el operador o manipulador. Ahora es simple fuerza motriz, o incluso simple accionador de una fuerza motriz distinta a su fuerza muscular. Si la realización de la tarea para la cual ha sido planeado el artefacto sigue siendo resultado de la manipulación del hombre y de su habilidad para ello, no se trata de una máquina, aún cuando la fuerza motriz sea ajena al hombre. En este sentido, los instrumentos agrícolas de tracción animal, como el arado, siguen siendo una herramienta, aunque la fuente motriz sea la fuerza de tiro animal, ya que depende de la habilidad del operador que el trabajo de arar se haga bien o mal. En cambio, un molino de viento o de agua para moler granos es una máquina, puesto que el hombre sólo pone en movimiento este artefacto, sólo le da el accionamiento inicial; una vez puesto en marcha, el viento o el agua se constituyen en la fuerza motriz, y sus componentes internos formados por engranes, muelas, ejes, etc.: se encargan de llevar a cabo la tarea de molienda.

En las máquinas, acorde a este marco de referencia, es posible distinguir de manera general tres componentes físicos: el componente motriz, el componente transmisor y el componente operativo. El componente motriz es la parte de la máquina que recibe o genera la fuerza motriz de toda la máquina. El componente transmisor lleva esta fuerza motriz al componente operativo. El componente operativo es el que está en contacto directo con el material que, al ser transformado, cumple la tarea para la cual la máquina ha sido diseñada. Dado que ahora la parte operativa no es operada directamente por el hombre, en las máquinas, que son los artefactos predominantes de la era tecnológica, el grado en el cual la tarea está bien o mal realizada ya no depende tanto de la habilidad humana.

La transición de la era artesanal a la era industrial constituye para Marx un acontecimiento fundamental en la historia de la técnica, lo cual es, para los fines de este trabajo, un testimonio importante a favor de la relevancia que aquí se le asigna a la transición de la técnica tradicional a la tecnología. En particular, Marx planteó que “la era de la producción a máquina [que equivale a la era tecnológica] se caracteriza también por representar una revolución en el empleo de los instrumentos de trabajo”.³⁵ Más específicamente: “la revolución industrial que caracteriza el modo de producción capitalista empieza con la transformación de la parte de la máquina que se encuentra en contacto directo con el material elaborado [componente operativo]”.³⁶ Ahora la parte operativa, que está conformada en realidad de un conjunto de instrumentos simples preexistentes como husos, agujas, sierras, garlopas, tijeras, raspadores, peines, cuchillos, etc., ya no es guiada por la mano humana, sino por componentes particulares que, al operar con gran regularidad, superan los “errores del instrumento” de la técnica

tradicional, con lo cual se supera el nivel de funcionalidad mínima de la era tradicional. El concepto de funcionalidad se explica en la siguiente sección.

Finalmente para captar aún mejor la distinción entre herramientas o instrumentos y máquinas, el siguiente texto de Marx³⁷ resulta pertinente:

La máquina se distingue principalmente por el hecho de que el instrumento antes independiente, actúa ahora como parte constituyente de un conjunto de instrumentos semejantes, y al mismo tiempo sólo hasta ahora ha adquirido dimensiones incomparablemente mayores en comparación con la potencia de la fuerza motriz.

La herramienta es el artefacto predominante en la técnica tradicional, de la misma forma en que la máquina predomina en la técnica científica. Los conceptos de funcionalidad mínima –asociado a la herramienta – y niveles mayores de funcionalidad –asociado a la máquina– que se explican en la sección I.5, y que son el tema central de esta tesis, permitirán desglosar aún más la distinción entre herramientas y máquinas, entre técnica tradicional y tecnología moderna.

I.5. Niveles de funcionalidad en la técnica

La diferencia más importante entre la técnica pre-científica y la científica es, desde el punto de vista de la ingeniería, el tipo de conocimiento empleado en ellas; por esta razón lleva en su denominación el carácter de científico y pre-científico. En consecuencia, los productos de ambas etapas de la técnica también se diferencian. Para caracterizar la diferencia entre productos de la técnica pre-científica y científica en función de la ausencia o presencia de conocimiento científico, en este trabajo se emplea el concepto de funcionalidad, el cual proviene del contexto de la ingeniería.

Todo artefacto, producto de la técnica, es concebido, construido y utilizado, es decir, diseñado con el fin de cumplir una tarea predeterminada, una *función*. Por ejemplo, un arado es diseñado para roturar el suelo y voltearlo, una cosechadora de cereales es diseñada para cosechar granos, y un tractor es diseñado para accionar otros artefactos para labores agrícolas, tales como rastras, sembradoras y cultivadores. Entonces, la función del arado es roturar y voltear el suelo, la de la cosechadora es cosechar granos, y la del tractor accionar otros artefactos. Cuando el arado, la cosechadora o el tractor cumplen la función asignada, entonces cumplen con el requisito de funcionalidad. Si la cosechadora no

podiera cosechar granos, entonces no sería funcional. Se dice entonces que un artefacto es funcional si cumple con el requisito de poder llevar a cabo la tarea para la cual fue diseñado.

La funcionalidad es un requisito que debe cumplir cualquier artefacto de la ingeniería. Pero la pura funcionalidad no es suficiente, puesto que en la ingeniería se cuantifica el grado en que un artefacto cumple su función. Se establecen así diferentes niveles de funcionalidad. Así, un arado es funcional sólo con poder roturar y voltear la tierra, pero estas tareas puede hacerlas a un grado apenas suficiente, denominado funcionalidad mínima, o hacerlas bien o muy bien, según la cuantificación que el ingeniero asigne a lo que para él significa funcionar bien o funcionar muy bien, o funcional a diversos grados. La evaluación numérica del nivel de funcionalidad se efectúa a través de una serie de parámetros de las máquinas, tales como la potencia, la velocidad de trabajo, la maniobrabilidad, la relación peso/potencia y otros, según el tipo de artefacto y el tipo de trabajo que éste efectúa. La calidad del trabajo que realiza un artefacto, evaluada a través de una serie de parámetros, también es un indicador del nivel de funcionalidad del mismo.

Al proceso de buscar el valor óptimo de algún criterio de funcionalidad, se le denomina optimización. La optimización representa el grado máximo posible que se puede alcanzar en los niveles de funcionalidad, y es una tendencia en la ingeniería moderna buscar los niveles óptimos de funcionalidad en los artefactos. En el capítulo V, dentro del proceso de diseño, se explica de qué manera la búsqueda de los niveles óptimos de funcionalidad en la técnica moderna, está ligada al manejo de modelos teóricos, como los modelos matemáticos, y de qué manera estos procedimientos se fundamentan en el conocimiento científico de las ciencias de la ingeniería.

En este trabajo se muestra que la incorporación de conocimiento y procedimientos científicos a los procesos técnicos, permitió transitar de un estado de mínima funcionalidad, característico de la técnica pre-científica, a un estado de búsqueda sistemática de la elevación de los estándares de funcionalidad, que es característico de la técnica científica. La época actual es, desde el ámbito interno de la ingeniería, una era de transición entre estos dos estados. Muchos artefactos no son realmente óptimos, pero su grado de funcionalidad es mucho mayor que hace un siglo, y cada innovación busca mejorar estos estándares, con la optimización como meta. Se resalta principalmente, que la unión del conocimiento técnico tradicional y el científico elevaron los estándares de funcionalidad en la técnica. Aquí se desarrolla un caso de la técnica agrícola en particular: la mecanización de la agricultura, aunque

cualquier área de la técnica podría mostrar lo mismo. De esta manera, se aprecia la importancia del aspecto práctico de la ciencia en un caso concreto: su influencia en el desarrollo de la técnica agrícola moderna, a través del papel que ha jugado en la elevación de sus niveles de funcionalidad.

⁷ Russell, Bertrand., *Religión y ciencia*, México, D. F., FCE, 1994, pág. 9.

⁸ Bernal, John D., *La ciencia en la historia*, México, D. F., Nueva Imagen, 1997, pág. 40.

⁹ Bunge, Mario., *La ciencia, su método y su filosofía*, s.l., Ediciones Quinto Sol, s. f., pp. 34-35.

¹⁰ Wartofsky, Marx W., *Introducción a la filosofía de la ciencia*, México, D. F., Alianza Editorial, 1986, pp. 45-46.

¹¹ Blauberg, I., *Diccionario de filosofía*, México, D. F., Ediciones Quinto Sol, 1996, pp. 45-47.

¹² Aristóteles, *Metafísica*, Libro I, Caps. I y II, Buenos Aires, Espasa Calpe, 1945, pp. 15-21.

¹³ Rapp, Friedrich., *Filosofía analítica de la técnica*, Barcelona, Alfa, 1981, pág. 42.

¹⁴ Ibidem, pág. 7.

¹⁵ Capanna, Pablo., *La tecnarquía*, Barcelona, Barral, 1973, pág. 17.

¹⁶ Ellul, Jacques., *El siglo XX y la técnica*, Barcelona, Editorial Labor, 1960, pág. 15.

¹⁷ Rapp, Friedrich., op. cit., pág. 38.

¹⁸ Bunge, Mario., *Seudociencia e ideología*, op. cit., pág. 24.

¹⁹ Dampier, William C., *Historia de la ciencia*, Madrid, Tecnos, 1986, pág. 19.

²⁰ Ukraintsev, Boris., "Las ciencias de la naturaleza y de la sociedad y el saber técnico", en *Hombre, ciencia, técnica; enfoque filosófico*, Instituto de Filosofía de la Academia de Ciencias de la URSS, pp. 183-188, Buenos Aires, Editorial Cartago, pág. 187.

²¹ González Casanova, 1987, citado por Méndez Ramirez, I., "Relación entre investigación científica e investigación tecnológica", en *El sistema de ciencia y tecnología en México*, pp. 107-122, México, D. F., UNAM, pág. 110.

²² Kedrov, B. y Spirkin, A., *Qué es la ciencia*, México, Ediciones Quinto Sol, 1992, pp. 7-8.

²³ Bunge, Mario., *Ciencia y desarrollo*, Buenos Aires, Ediciones Siglo Veinte, pág. 33.

²⁴ Leff, Enrique., *Ciencia, técnica y sociedad*, México, D. F., ANUIES, 1977, pp. 138-139.

²⁵ Ibidem, pág. 140.

²⁶ Bunge, Mario., *Ciencia y desarrollo*, op. cit., pág. 34.

²⁷ Bunge, Mario., *Seudociencia e ideología*, México, D. F., Alianza Universidad, 1986, pág. 33.

²⁸ Bunge, M., op. cit., pág. 35.

²⁹ León López, E., *La ingeniería en México*, México, D. F., LIMUSA, 1989, pág. 12.

³⁰ Documento de la carrera de ingeniero mecánico agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx., 1996, pág. 4

³¹ Hunt, Donnel R. y Garver, Lester W., *Farm Machinery mechanisms*, Ames, The Iowa State University Press, pág. 1.

³² Rapp, F., op. cit., pp. 97-102.

³³ Marx, Karl. *Capital y tecnología. Manuscritos inéditos (1861-1863)*, al cuidado de Piero Bolchini, México, D. F., Terra Nova, 1980, pp. 71-140.

³⁴ Ibidem, pág. 76.

³⁵ Ibidem, pág. 74.

³⁶ Ibidem, pág. 76.

³⁷ Ibidem, pág. 78.

II. TECNICA AGRICOLA TRADICIONAL

Las técnicas agrícolas pre-científicas, o tradicionales, que comprenden los medios técnicos creados desde la prehistoria hasta finales del siglo XVIII, fueron básicamente funcionales al nivel mínimo, en los términos presentados en la sección I.5. A partir de esta época, en las técnicas agrícolas comienza un proceso, cada vez más rápido, de incremento en los niveles de funcionalidad, tendiente hacia la optimización de los artefactos empleados en la producción agrícola. Este cambio, analizado desde el marco interno de las ciencias de la ingeniería, se debió a un cambio en el conocimiento empleado para el mejoramiento de los artefactos existentes y la creación de otros novedosos.

A grandes rasgos, las técnicas tradicionales representan los logros alcanzados por el hombre en base al conocimiento práctico acumulado hasta entonces. En este capítulo no se detalla el proceso cronológico del desarrollo de los artefactos agrícolas como tema central. El objetivo es mostrar tanto el alcance como las limitaciones del conocimiento técnico tradicional, a través del nivel de funcionalidad alcanzado por la técnica agrícola en un periodo que abarca desde la aparición de la técnica hasta el siglo XIX. Cuando fue incorporado el conocimiento científico disponible apareció el conocimiento tecnológico, mezcla de ciencia y saber técnico tradicional, en base al cual se diseñan las máquinas e implementos agrícolas actuales.

Hasta antes del siglo XVIII, los artefactos de la técnica agrícola, tales como las herramientas manuales, el arado y el molino de viento, fueron capaces de llevar a cabo la función para la cual fueron construidos de manera más o menos satisfactoria, aunque en general poco eficiente si se les compara con los estándares usuales de las máquinas de la segunda mitad del siglo XX, es decir, al nivel de mínima funcionalidad. A lo largo de este periodo pre-científico, el hombre fue acumulando conocimientos confiables para la acción práctica sobre su entorno. En los últimos milenios de este periodo, el hombre ordenó buena parte de esta información técnica en forma de reglas prácticas, un tipo de conocimiento que Wartofsky³⁸ reconoce como pre-científico, porque en su opinión, es uno de los tres tipos de conocimiento que dieron origen al conocimiento científico moderno.

Los tres tipos de conocimiento pre-científico, según la clasificación presentada por Wartofsky son: 1) el de tipo mágico o explicación antropomórfica, que basa sus explicaciones en base a poderes o seres imaginarios; 2) la generalización inductiva, que es un conocimiento de generalizaciones basadas en la

experiencia, y 3) las reglas técnicas, que es un conocimiento de las reglas de actuación bien establecidas asociadas a alguna habilidad o pericia para alguna técnica, o reglas de trabajo. Estos tipos de conocimiento, según Wartofsky, son intentos de ordenar de algún modo la experiencia adquirida con miras a alcanzar el dominio sobre un medio.

Tomando como guía esta caracterización, las reglas técnicas son de especial significado para ubicar el tipo de conocimiento práctico involucrado con las técnicas agrícolas tradicionales, en las cuales se aprecia una acumulación de conocimientos y una ordenación de la experiencia adquirida, plasmadas en el desarrollo de los artefactos logrados. Este conocimiento técnico, una vez ordenado en reglas técnicas, llegó a ser confiable dentro de ciertos ámbitos, y permitió construir artefactos de la complejidad del molino de viento y la rueda hidráulica al final de la etapa pre-científica. Aún hoy en día, gran parte de los procedimientos y prácticas agrícolas exitosas, de las cuales se dice que son científicas, son en realidad reglas técnicas. Pero éstas tienen sus limitaciones en lo que respecta al grado de funcionalidad que puede alcanzarse con ellas.

Dos características relevantes de las técnicas pre-científicas, según Ellul,³⁹ y que se observan en las técnicas agrícolas son las siguientes:

- 1) La técnica sólo se aplicaba a campos muy limitados del entorno humano, campos cuyo número era también limitado. La procuración de alimentos, primero en las modalidades de caza y recolección, y luego en forma de producción, era uno de esos campos. La guerra, el vestido y la vivienda eran otras áreas de aplicación de la técnica.
- 2) Existía muy poca variedad de medios técnicos para obtener un resultado, y apenas sí se hacía algo para mejorar esos medios.

Ambas características, como se verá en los ejemplos que se mostrarán a continuación, están vinculados al tipo de conocimiento involucrado, y ambas condiciones dieron a la técnica agrícola tradicional un margen de funcionalidad limitado. Las dos características que expone Ellul significan que, en general, los incentivos para desarrollar la técnica no son muy fuertes. Al respecto, este autor planteó que:

Para el hombre primitivo, y durante mucho tiempo en la Historia, el trabajo era una condena, en manera alguna una virtud. Vale más abstenerse de consumir que trabajar mucho, y sólo debe trabajarse en la estricta medida necesaria para vivir. Se trabaja lo menos posible...actitud muy frecuente, que, desde luego, restringe a la vez el dominio de las técnicas de producción y de consumo.⁴⁰

Si a esto se agrega que el conocimiento técnico, aunque confiable era limitado, el resultado más probable es que no fue posible ir más allá de un grado de funcionalidad igualmente limitado. Esto no

significa sin embargo, que el grado de funcionalidad se haya mantenido siempre constante. En casos particulares, que fueron más bien excepciones, la funcionalidad se acercó mucho al grado que hoy se reconoce como óptimo. Pero las herramientas conocidas apoyan la evidencia de que, en la gran mayoría de los casos sí mejoró, pero muy poco comparado con un nivel óptimo.

II.1. Antecedentes de la técnica agrícola

Desde tiempos prehistóricos, hace catorce millones de años, algunos homínidos, ubicados en la línea evolutiva humana, utilizaban objetos de piedra, elegidos en su estado natural, para triturar vegetales, al igual que hoy lo hacen distintas especies de primates, tales como los chimpancés y los gorilas. También se utilizaban huesos de animales para estos propósitos. Sin embargo, a diferencia de los monos, el hombre adquirió la capacidad de fabricar y no solo de elegir sus objetos para algún tipo de acción específica. Como lo ha expuesto Chavaillon:⁴¹

Si el mono se sirve de utensilios naturales, sólo el hombre los fabrica de piedra, de hueso –y ahora de metal–, para cortar y machacar. Todo animal, incluido el chimpancé, se sirve para estas funciones de sus atributos naturales: manos y pies, dientes y uñas. Los monos, como los carnívoros, desgarran sus presas, pero no utilizan cuchillos de piedra, ni siquiera los fragmentos naturales cortantes.

Los homínidos pasaron de la simple selección de objetos a su fabricación en un proceso que duró varios millones de años, dada su carencia de fuertes caninos y de las garras de los verdaderos carnívoros. Tuvieron que aprender a manejar hábilmente palos y piedras para desgarrar los animales muertos, primero hallados al rastrear y luego como producto de la caza. Aprendieron a fabricar utensilios de formas cada vez más elaboradas, y a partir de materiales cada vez más difíciles de trabajar. Aprendieron también a disponer de fuentes de energía de magnitud creciente y adquirieron una cada vez mayor habilidad para utilizar todos estos medios técnicos. Por ejemplo, entre los múltiples usos del fuego, además de la cocción de algunos alimentos, éste fue utilizado para endurecer la madera empleada para fabricar armas y herramientas, así como para romper rocas.

Uno de los más antiguos antecesores de los primeros utensilios agrícolas del hombre, es el tajador, con una antigüedad entre dos y tres millones de años. El tajador era una piedra seleccionada por ser lisa, a la cual, a golpes contra otra piedra, se le desprendían dos o tres hojas o lascas, obteniendo así un extremo con un filo o punta muy tosca por un lado, y una superficie lisa para sujeción cómoda con la mano por el otro extremo. Así, el hombre fue mejorando sus utensilios, desde la “simple” selección de piedras formadas por la propia naturaleza, la fabricación de tajadores y luego una variedad de

instrumentos como martillos, hojas afiladas, puntas, hachas de mano, raspadores, hendedores, cuchillos, cinceles, buriles, etc. Este proceso es descrito por Chavaillon⁴² de la siguiente manera:

Hace algunos millones de años, el hombre habría utilizado piedras para romper las cáscaras de frutos duros, al igual que los chimpancés actuales. También habría tenido la idea de golpear dos piedras, una contra la otra. De este modo habría obtenido un fragmento o lasca muy útil para procurarse alimentos. La idea de desprender una lasca de un bloque de roca acaso tenga su origen en la observación de una piedra rota por causas naturales, o procede de un error de manipulación –un percutor que se rompe, un guijarro del que separa una lasca durante su uso- incitando al hombre a repetir este gesto. No cabe duda de que esto es lo que ocurrió entre la época en que el keniepiteco utilizaba piedras a guisa de utensilios y aquella en que los hombres fabricaban artefactos tallando los guijarros: un largo periodo de once millones de años. Azar, accidente, observación, razonamiento.

El mejoramiento de todas estas herramientas fue lento. En este proceso fue acumulada una gran cantidad de información acerca de estos aspectos. El accidente, la observación, así como el ensayo y error fueron, al parecer, los medios a través de los cuales se fue aumentando el filo, en un proceso en el cual algunos miembros de un grupo se fueron especializando en la fabricación de los utensilios. La capacidad en la técnica paleolítica se puede apreciar en tres técnicas básicas de manufactura desarrolladas durante este periodo.⁴³ También se aprecia en los productos logrados. Estas tres técnicas de manufactura, en orden de aparición son: 1) técnicas de piedra contra piedra, 2) técnicas de la barra y 3) técnicas de descantillado a presión. Las dos primeras son métodos de obtención de instrumentos a base de percusión o golpes, siendo más precisa la segunda. En la técnica de piedra contra piedra, se utilizaba una piedra como martillo para asestar un golpe en el borde de otra piedra, de la cual saltaba una astilla o una hoja, dejando una huella, como se muestra en la figura 1. Dando unos golpes más de la misma manera y en los lugares adecuados, como se aprecia en la figura 2, en la secuencia (a) y (b), se obtenía el tajador de la figura 2 (c).

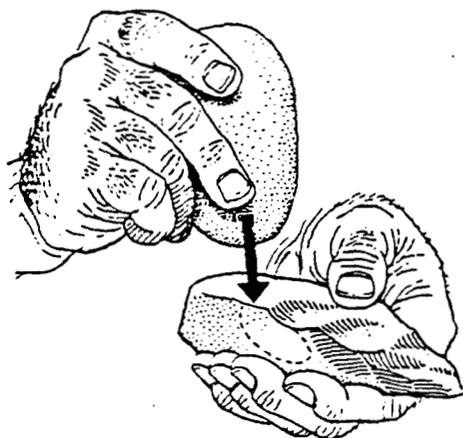


Figura 1. Fuente: Howell, F. Clark.,
El hombre prehistórico, pág. 110

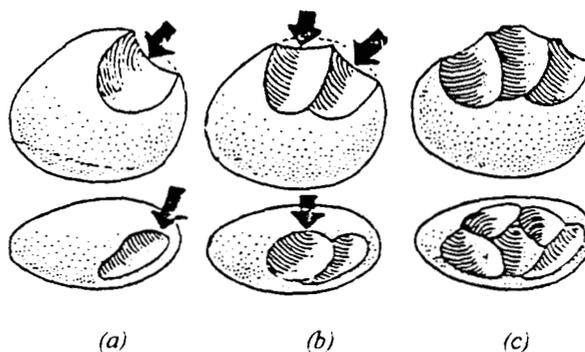


Figura 2. Fuente: *Ibidem*, pág. 111.

En la técnica de la barra, en primer lugar se obtenía un núcleo de piedra desbastada en toda su superficie utilizando un martillo de piedra. Para el acabado, con un martillo de hueso o de madera se

golpeaban los bordes del utensilio para desprender astillas, como muestra la figura 3(a), para obtener un instrumento como el hacha de mano de la figura 3(b), con bordes mucho más afilados que el tajador. El hacha de mano fue utilizada por el género humano al menos durante unos cien mil años.⁴⁴

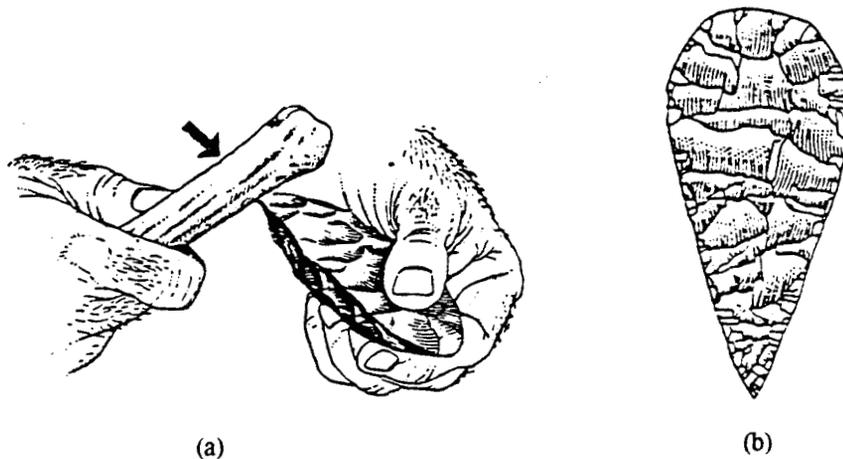


Figura 3. Fuente: *Ibidem*.

La técnica del descantillado a presión, en la cual se utilizaba un instrumento puntiagudo de madera o de hueso para desprender astillas más finas, como muestra la figura 4(a), permitió obtener puntas como la de la figura 4(b), utilizadas para cazar.

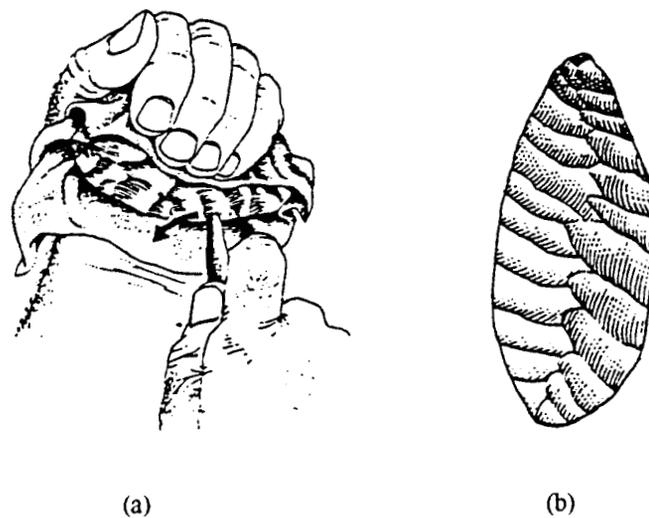


Figura 4. Fuente: *Ibidem*.

Utilizando estas tres técnicas, a lo largo del Paleolítico el hombre fue capaz de cazar animales y luego cortar su carne y raspar sus pieles para vestirse con ellas, escarbar para extraer raíces comestibles y fabricar instrumentos que a su vez le permitieron fabricar otros.

II.2. Desde la aparición de la agricultura hasta el siglo XVII

Entre los años 6 000 y 3 000 a.C. se desarrolló una variedad de medios técnicos, en una región amplia del río Nilo y el Mediterráneo oriental. En general, el hombre aprendió a usar la fuerza del viento en embarcaciones de vela, inventó la rueda y con ella el carro de ruedas, descubrió los procesos químicos necesarios para trabajar el cobre y las propiedades físicas de los metales conocidos. Se inventó la escritura. Este periodo fue tan fructífero en invenciones y acumulación de conocimientos que, según Childe, en ningún otro periodo de la historia, hasta los días de Galileo, fue tan rápido el progreso del conocimiento, ni tan frecuentes los descubrimientos de largo alcance. Otro ejemplo de referencia al nivel de innovación técnica de este periodo es el que expusiera Drucker,⁴⁵ para quien este periodo representa “la primera revolución tecnológica”, sustentada en el nacimiento de la agricultura de riego. Según este autor,

esta era de la civilización del riego fue, sobre todo, una era de innovación tecnológica. Hasta un ayer histórico, el siglo XVIII, no surgieron innovaciones tecnológicas comparables en su alcance y su impacto a aquellos antiguos cambios en tecnología, herramientas y procesos. En realidad, la tecnología humana permaneció esencialmente invariable hasta el siglo XVIII, en lo que se refiere a su impacto sobre la vida y la sociedad humana.

En este periodo, correspondiente al Neolítico, se inventó la agricultura, con el manejo de cultivos y la domesticación de animales para la alimentación humana. Al parecer, la agricultura se originó por primera vez hace unos 7 000 años, en Mesopotamia, una extensión de tierras entre los ríos Eufrates y Tigris, actualmente Irak. Se cultivaba cebada, trigo, forrajes y algunos frutales como higo, olivo, albaricoque, granada y membrillo. Un poco más tarde, en Egipto, se cultivaba, además de cebada y el trigo, lenteja, frijol, nabo, cebolla, ajo, dátil, higo, espárrago, granada y alcachofa. Otras regiones del mundo también dieron origen a la agricultura de manera independiente. Por ejemplo, en el Valle de México, alrededor del 3 500 a.C., ya se cultivaban especies vegetales como la calabaza, maíz, frijol, chile y aguacate.⁴⁶ Pero el origen de la actividad agrícola en territorio mexicano se ubica por algunos aún antes del 5 000 a.C. en la región de Tehuacán.

La agricultura implica al menos las siguientes labores: eliminación de la vegetación natural y roturación de superficies de terreno virgen, siembra y protección de la semilla, destrucción de la maleza y conservación o aplicación de reservas de agua durante el crecimiento de la planta, y después de la recolección de la cosecha, el almacenamiento de la semilla en lugar seguro para reserva alimenticia y para la siguiente siembra. El cuidado de los animales domesticados para obtener de ellos carne y otros beneficios es también parte de la agricultura. Para mantener la producción de alimentos, se necesitaba abrir continuamente nuevos terrenos vírgenes. Aquellos primeros agricultores se dieron cuenta de que

los terrenos agotaban su fertilidad si se sembraban varias veces de manera ininterrumpida. Sin embargo, las veces que se sembraba repetidamente el mismo terreno, se requería labrar el suelo a mayor profundidad en cada nueva ocasión. Por ello, el invento del arado, el instrumento más eficaz para roturar el suelo, fue tan importante, y por ello surgió tan temprano dentro de los artefactos agrícolas. En Egipto se desarrolló el riego artificial, utilizando canales y presas. Junto con el arado, en aquella región se desarrolló un conjunto importante de herramientas manuales para el trabajo agrícola.

En esta época aparecieron los especialistas en la fabricación de herramientas. El saber práctico, técnico, sobre el cual se desarrollaron aquellos artefactos, era ya cuidado y transmitido de una generación a otra de especialistas, identificados como artesanos. El artesano especialista sólo puede mantenerse si los productores de alimentos están organizados de tal forma que pueda proveer con regularidad un excedente. Derry y Williams⁴⁷ explican esta secuencia de la siguiente manera:

La agricultura avanzó durante mucho tiempo a costa de pruebas y errores, hasta que, después de utilizar numerosos tipos y métodos de cultivo, comenzó a predominar paulatinamente un pequeño número de ellos. La obtención de cosechas regulares proporcionó los primeros excedentes; los excedentes, a su vez, dieron lugar al surgimiento del especialista; y la existencia del especialista, a la especialización de los utensilios agrícolas.

Estas condiciones se consiguieron sobre todo en las tierras dedicadas a la agricultura ubicadas en las riveras de los ríos, donde las cosechas eran más abundantes. Así, la aparición del artesano está ligada a la aparición de la agricultura. Aunque, como se ha ejemplificado con el hacha de mano, los instrumentos agrícolas son anteriores a la propia agricultura. Instrumentos como la hoz o cuchilla para segar, así como todos los instrumentos toscos de piedra mencionados de la época paleolítica, se utilizaron primero para cortar hierbas silvestres y para rasgar la carne de animales de caza, y después se utilizaron en la agricultura.

El hombre del Neolítico aprendió a pulir los utensilios de piedra, lo cual dió paso a una serie de instrumentos que jugaron un papel importante en la agricultura, gracias a la cual la recolección y la caza se fueron abandonando como las formas básicas de procuración de alimentos. En particular, el hacha de piedra pulimentada o azuela fue muy importante, porque gracias a ella se dispuso de un instrumento para cortar y labrar la madera, dando lugar al inicio de la carpintería, con lo cual se pudo construir herramientas para el trabajo agrícola, tales como arados, ruedas, palas y estacas. Después, este instrumento se utilizó para abrir la tierra de cultivo. El hacha formó parte, junto con otros instrumentos de aquella época que se caracterizaban por la unión de un palo y una piedra pulimentada, de una serie de instrumentos agrícolas que utilizaban exclusivamente la fuerza muscular humana para

las primeras labores agrícolas, haciendo un uso funcional del principio de la palanca. Algunos de estos instrumentos se muestran en la figura 5.

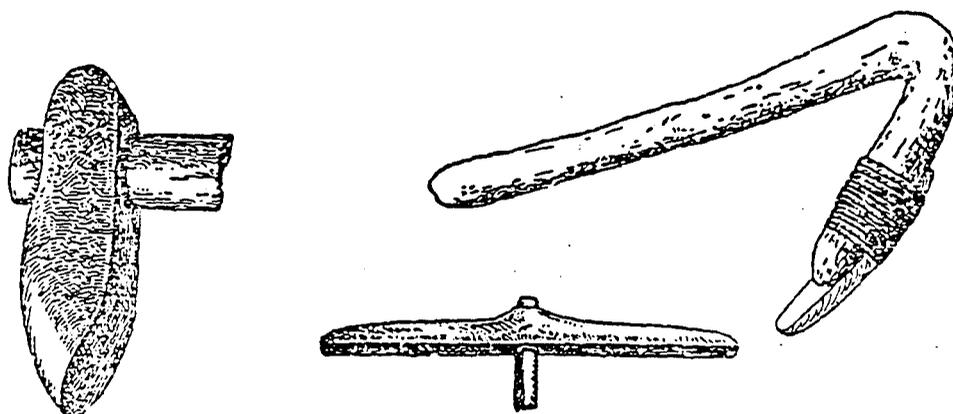


Figura 5. Childe, V. Gordon., *Los orígenes de la civilización*, pág. Pág. 91.

El paso de la piedra tallada a la piedra pulimentada constituyó una mejora notable en la funcionalidad de los instrumentos agrícolas. Los instrumentos de piedra pulimentada, a diferencia de los anteriores de piedra tallada, ya no se rompían tan fácilmente, y su filo era más agudo y duradero. La observación y el accidente, a juicio de los autores que describen la historia, jugaron el papel más destacado, junto con algo de experimentación, para la acumulación, organización y aplicación del tipo de conocimiento práctico sobre el cual se desarrolló toda esta técnica agrícola prehistórica. Por ejemplo, para explicar cómo pudo desarrollarse la técnica de pulir la piedra, Childe⁴⁸ sugirió que:

La nueva técnica parece haber sido sugerida por los efectos observados en las piedras empleadas como rodillos para moler granos sobre otras piedras. O, tal vez, al cavar las parcelas cultivadas, una lasca suelta fue amarrada al extremo de una estaca, formando una especie de azada, y después, el borde de la hoja pudo ser pulido en forma aguzada, frotándolo con arena.

En Babilonia, entre 3 700 y 2 600 a.C. se utilizaron hoces de arcilla para cortar el trigo. La hoz es una herramienta manual consistente en una hoja curvada con dientes en su borde o filo interior. Las hoces de arcilla son las antecesoras de las metálicas, que se utilizaron desde alrededor del 2 000 a.C en Turquía, fabricadas de bronce. Más tarde, alrededor de 1 200 a.C. se fabricaron de hierro, con un mango de madera a manera de empuñadura. Este instrumento, con pocas modificaciones, y junto a algunos otros parecidos, prevaleció como herramienta de corte de trigo y otros cereales como la cebada, hasta el siglo XVIII, cuando se inventaron las cosechadoras de tracción animal. La figura 6 muestra algunos ejemplares de estos instrumentos.

Antes de las hoces, se utilizaron cuchillos rectos con dientes, primero hechos de pedernal y luego de arcilla o de hueso para cortar cereales. Con las hoces, el trabajo se hizo más rápido y menos fatigoso.

La rapidez de corte aumentó cuatro veces.⁴⁹ El paso del cuchillo recto a la hoja curvada de la hoz para el corte de cereales es un buen ejemplo de cómo la observación y la práctica permitieron pasar de una herramienta a otra más funcional en la época pre-científica de la técnica, en base al conocimiento técnico empírico. Esta transición duró miles de años.

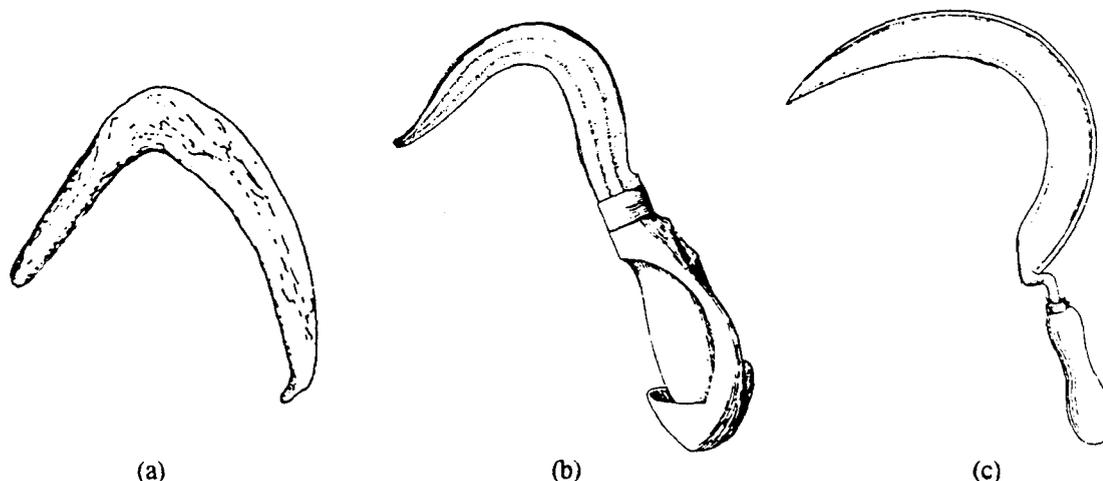


Figura 6. (a) hoz de arcilla, de 3 700 a.C. a 2 600 a.C. (b) hoz de metal, de 1 000 a.C. (c) hoz moderna, de uso actual. Fuente: Quick, G. R. y Buchele, W. F., *The grain harvesters*, pp. 5-6.

La transición de las herramientas manuales a las de tracción animal se llevó a cabo hacia el año 3 000 a.C. en Mesopotamia, aunque el arado, accionado primero por fuerza muscular humana y luego por tracción animal, al parecer data de alrededor de 4 000 años a. C. Una hipótesis sobre el proceso de invención de este artefacto es la que Meier expone de la siguiente manera:⁵⁰

Las palancas han sido los primeros ingenios utilizados por el hombre primitivo; la combinación entre el palo de la palanca y una piedra u otro material de masa constituye una herramienta que hasta hoy día sólo ha cambiado en su apariencia externa, como el martillo. El hombre del campo primitivo debería percatarse de que un palo con una forma determinada le facilitaba enormemente la tarea de cavar la tierra. En un principio es probable que utilizase esta herramienta sólo para excavar raíces comestibles; más adelante, cuando el hombre se hizo sedentario, esta herramienta se convirtió en un primitivo azadón. Con la vida sedentaria surgió pronto la necesidad de cavar cada vez más tierra, en razón de la disminución de la fertilidad. Unir a un palo curvado en un extremo unas cuerdas eran una solución, por que dos o tres personas podían arrastrar la herramienta mientras otro hombre la guiaba, procurando que su punta penetrase lo bastante en el suelo para que la labor resultara provechosa (figura 8). Así se inventó el arado, que tenía más o menos la forma de un gancho de madera. Esta forma persistió incluso después de que el hombre empezase a domesticar los animales.

La figura 7 muestra la forma más antigua del arado, según la descripción de Meier. Estos instrumentos, manejados por dos hombres, permitían abrir surcos de 5 a 6 centímetros de profundidad. El trabajo que se lograba era tosco.

En el segundo milenio a.C., en Egipto, se agregó a este precursor del arado una reja de madera o de piedra, dando como resultado una estructura adecuada para la tracción animal, con lo cual se aumentó

la profundidad de trabajo. La primera modificación importante, la introducción de una vertedera de madera curvada para voltear los terrones que se levantaban cuando la reja abría el surco, se llevó a cabo en Europa en el siglo XI, aunque los chinos ya habían utilizado un aditamento parecido dos mil años antes. La figura 8 ilustra varios modelos de arado en una secuencia de aparición (a), (b), (c), y (d), que muestra lo poco que este implemento cambió hasta el siglo XVIII, cuando se comenzaron a fabricar completamente de hierro (similares a los que se utilizan hoy en regiones con agricultura tradicional).

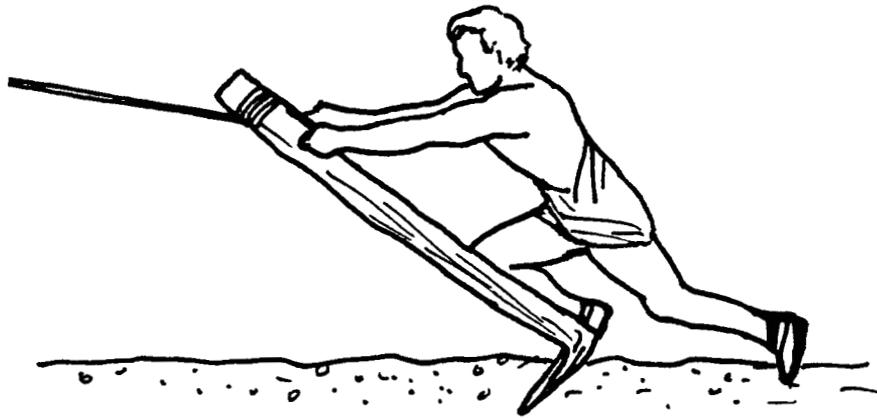


Figura 7. Antecesor del arado.

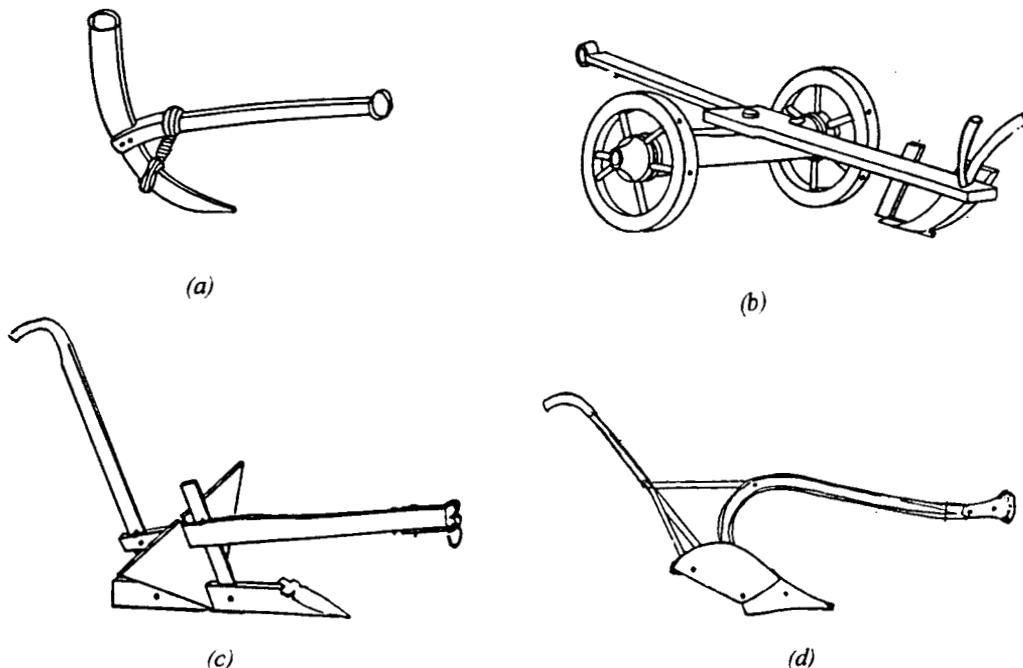


Figura 8. Modelos de arados, desde el más antiguo de madera (a), hasta el de hierro (d).

Los griegos utilizaban máquinas a base de piedra labrada para extraer aceites y para moler grano alrededor del siglo IV a.C. Los romanos no agregaron innovaciones técnicas importantes a los instrumentos agrícolas. Utilizaban simples entramados de ramas espinosas para arrancar malas hierbas.

para cubrir las semillas sembradas y para complementar el trabajo del arado. Utilizaron algunos instrumentos de madera como rastrillos y escaleras, y algunos con mango de madera y aditamentos de hierro como palas y picos. Para separar el grano de la cáscara (trillado), se utilizaban animales para que lo pisaran con sus pezuñas, o bien una tabla incrustada con piedras.

Las herramientas manuales, formadas al principio por un palo y una piedra pulimentada, como las de la figura 5, al igual que el arado, que se constituyeron en los instrumentos agrícolas más importantes, prácticamente no cambiaron hasta la Edad Moderna. Sólo en algunas de estas herramientas se sustituyó la piedra por algunos metales como el hierro. Por ejemplo, en el siglo XII se registró en Europa una expansión de la superficie agrícola, para incorporar a esta actividad las tierras que aún se encontraban vírgenes. En aquel tiempo, sólo la mitad de Francia, un tercio de Alemania y un quinto de Inglaterra estaban cultivadas, dado que el resto eran superficies boscosas, pantanosas o simplemente deshabitadas. La apertura de nuevos terrenos agrícolas se llevó a cabo con la utilización de herramientas de trabajo propias de la técnicas de la Antigüedad, lo cual se aprecia por el testimonio de un campesino de la época, quien decía que: “miles de pioneros vinieron para preparar el camino para la labor de arado y azada, quemando malezas y maniguas y vegetación parásita, limpiando los bosques con el hacha y desarraigando troncos, con el pico”.⁵¹

Hasta el siglo XVI comenzaron a aparecer nuevos artefactos para la agricultura, aunque no de manera intensiva sino hasta el siglo XVIII. La lenta evolución en unos 5 000 años de las herramientas manuales como palas, azadones, machetes y hachas, al igual que el arado, atestiguan que la funcionalidad de los medios técnicos agrícolas casi no mejoró en todo este periodo. Los instrumentos manuales de la figura 9, utilizados aún hoy en día en algunas regiones que utilizan técnicas tradicionales, tienen una construcción y utilización muy similar a las herramientas de hace por lo menos 2 000 años.

De esta manera, para el siglo XVII, las herramientas agrícolas eran prácticamente las mismas, o muy similares en cuanto al nivel de funcionalidad que las empleadas en la Antigüedad. El testimonio de Charles L Flint,⁵² secretario de la Junta de Agricultura de Massachusetts, quien publicó, en 1872, un artículo titulado *Cien años de progreso*, es un ejemplo ilustrativo del estado de la técnica agrícola alrededor del siglo XVII. Flint se refería así a los aperos agrícolas de los primeros colonizadores de Estados Unidos:

Uno de los principales obstáculos que tuvieron que vencer los primeros colonizadores, además de sus penalidades al tratar de cultivar el suelo, fue la dificultad de procurarse aperos adecuados. Es indudable que trajeron algunos consigo, pero no todos pudieron obtenerlos así, y el único metal de que disponían estaba hecho con limonita, tan frágil que se rompía fácilmente interrumpiendo la jornada de trabajo. Casi todos sus utensilios eran de madera, de

hechura muy tosca, pesados por necesidad y poco idóneos para el objeto que perseguían. El proceso de fundición de acero era desconocido entonces... Los pocos utensilios de labranza que tenían eran, en su mayor parte, de fabricación casera, o hechos por el herrero más próximo como parte de sus múltiples tareas, ya que apenas existía la noción de la división del trabajo; no poseían maquinarias que pudieran sustituir con eficacia a ninguna herramienta.

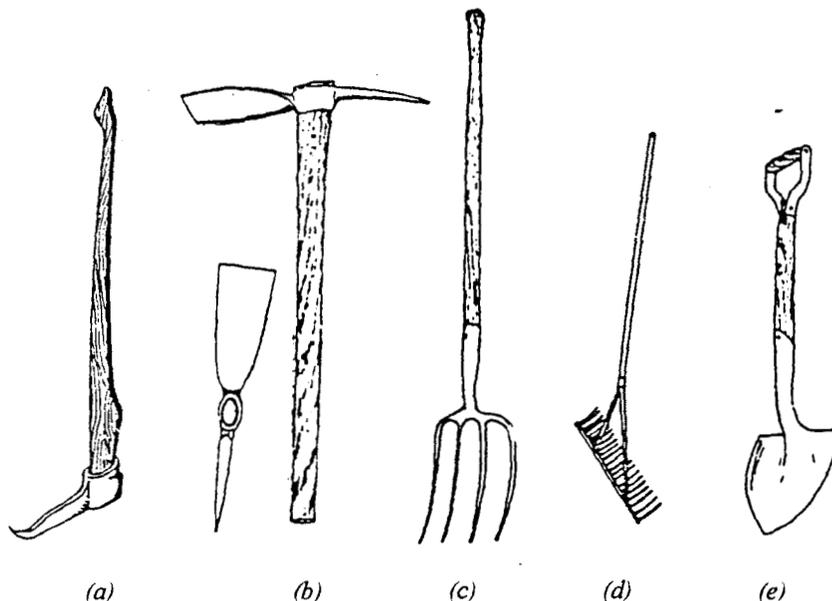


Figura 9. Instrumentos agrícolas tradicionales: a) pico para mover madera; b) zapapico (o pico), para cavar tierra y romper raíces; c) bieldo, para cargar forraje; d) rastrillo, para recoger rastrajo; e) pala, para cavar y mover tierra.

Refiriéndose aún al siglo XVII, continúa Flint:

El viejo y macizo arado de madera requería una yunta fuerte, un hombre fornido para aguantar, otro para sostener y otro para conducir. El trabajo era lento y laborioso. Las demás herramientas eran una pala pesada, una horqueta de madera y más tarde una trilla. He tenido en mis manos ejemplares de esas horquetas que cuentan con dos siglos de vida: es difícil adivinar cómo pudieron hacer un trabajo eficaz.

Los arados utilizados por los colonizadores franceses en el "suelo americano" de Illinois, desde la fecha de su ocupación en 1682 hasta la guerra de 1812, eran de madera, con una pequeña punta de hierro sujeta por medio de tiras de cuero crudo. Los travesaños descansaban sobre un eje y pequeñas ruedas de madera. Eran arrastrados por bueyes uncidos por los cuernos; los yugos eran rectos y estaban sujetos a los cuernos por tiras de cuero crudo, mientras una pértiga se extendía hacia atrás desde el yugo del eje. Estos arados eran pesados y molestos; no emplearon arados pequeños para maíz hasta cerca de 1815. Utilizaban una especie de carretas que no tenían ninguna partícula de hierro.

Entre las formas del viejo arado de madera conocidos durante el último siglo [siglo XVII] está el conocido como arado Carey. Fue de todos el que más se utilizó aunque su forma variaba mucho según la habilidad de cada herrero o carretero que los fabricaba. La parte más próxima a la tierra y el soporte eran de madera y tenían una tabla de madera moldeada, frecuentemente cubierta en forma muy tosca con trozos viejos de lata o hierro laminado.

En este testimonio, de primera mano, de alguien que conoció estos aperos y que los compara con los arados y demás aperos y máquinas agrícolas disponibles a finales del siglo XIX, se aprecia lo tosco que debieron ser tales utensilios y su bajo nivel de funcionalidad. El relator deja muy claro lo difícil y arduo que era su manejo. También destaca que, lo bien o mal que esté hecho un utensilio de aquella

época (en este caso un arado, aunque es de suponer que con el resto de las escasas herramientas fuese la misma situación) dependía tan sólo de la habilidad de quien la fabricaba, que podía ser un herrero no especializado, o el propio agricultor, con herramientas no adecuadas para tal propósito. El manejo de algunos tipos de arados en la antigüedad llegó a ser tan arduo, que requerían hasta de doce bueyes para tirar de ellos en el trabajo. Y con el resto de los instrumentos de labranza de aquellos colonizadores del siglo XVII, la situación no era muy diferente. Flint continúa diciendo que “los otros aperos de labranza eran [también] escasos y muy toscos”. Y puntualiza:

Se ha llegado a decir que un hombre fornido, antes de principio del presente siglo [refiriéndose al siglo [XVIII], podía cargar sobre sus hombros todos los utensilios empleados en su granja, excepto, quizá, el viejo carro de madera y el mayal; sabemos que el número, así como la variedad de dichas herramientas, era muy exiguo... Hemos visto que los colonizadores poseían herramientas pobres e ineficaces, un ganado flaco que apenas le traía beneficios, cosechas mezquinas, e ideas estrechas y miserables acerca de la agricultura.⁵³

En realidad, desde el siglo XVI se comenzaron a dar un serie de condiciones para mejorar la técnica agrícola en Inglaterra. A la par del resurgimiento de la horticultura, comenzó a generarse una notable, aunque empírica literatura agrícola. Esta literatura, aunque no tuvo el efecto esperado en el estímulo para la innovación en los métodos agrícolas, preparó el camino para que en el siglo XVIII algunos personajes como Jethro Tull introdujeran nuevos métodos en las prácticas agrícolas, basados ahora en la ciencia.

La explicación de Meier sobre la invención del arado, el largo periodo durante el cual casi no cambió este instrumento, y el testimonio de Flint acerca del estado de la técnica agrícola en el siglo XVII, son indicadores del papel que jugaron el accidente y la observación en la lenta adquisición y organización del saber práctico sobre el cual se desarrolló la técnica agrícola pre-científica, desde el inicio de la civilización y hasta el siglo XVII. En este periodo, expone Ellul⁵⁴ que:

La civilización no se orienta hacia nuevas creaciones de instrumentos, en respuesta a cada nueva necesidad, sino a la aplicación, cada vez más extensa, perfecta y refinada de los mismos medios disponibles.

Se trata, en efecto, de compensar, mediante la habilidad del obrero, la deficiencia de la herramienta. La investigación tiene por objeto la habilidad, el truco del oficio, el golpe de vista, etc., todas las perfecciones humanas que pueden dar el máximo de eficacia al modesto útil de que se dispone.

En realidad también la experimentación deliberada jugó algún papel, aunque diferente a la experimentación propia de las ciencias modernas. Sin embargo, a lo largo de todo esto miles de años de experiencia empírica, el hombre fue ordenando su propia experiencia en un conjunto de reglas prácticas, las reglas técnicas de las cuales se habló al principio de este capítulo.

Las reglas técnicas cumplen al menos dos de las características que Nagel⁵⁵ le asigna al sentido común para diferenciarlo del conocimiento científico. Estas dos características, como se expone a

continuación, parecen sugerir porqué la técnica agrícola tradicional tuvo tan pocas innovaciones en tan largo tiempo y, en general, porqué no pasó de cierto grado de funcionalidad:

1) Nagel plantea que, aún cuando el sentido común incluya información exacta de los eventos de interés, no incluye una explicación acerca de porqué los hechos son como se presentan y no de otra manera. Cuando se presenta alguna explicación, ésta carece de pruebas críticas de su vinculación con los hechos; tal es el caso de las explicaciones mágicas. La acumulación, ordenación y aplicación del conocimiento práctico para la invención, construcción y operación de las técnicas agrícolas tradicionales, en general, salvo excepciones, se dieron en un entorno en el cual las explicaciones de los hechos conocidos eran de tipo mágico o sobrenatural. Al respecto, Rapp planteó que en el periodo correspondiente a la técnica pre-científica, y aún hasta los siglos XVII y XVIII, “la naturaleza era entendida como un organismo animado, impulsado por demonios y fuerzas mágicas enigmáticas”.⁵⁶ En consecuencia, la invención o innovación técnica era considerada como un proceso misterioso, surgida de alguna clase de inspiración sobrenatural y no tanto en investigaciones empíricas conscientes y en procesos racionales. En este contexto, incluso hasta el siglo XVIII, reconoce Rapp, los inventos son en su mayor parte obra de aficionados y no de especialistas. No se recurrió entonces a conocimientos especializados para la innovación en la técnica tradicional, por lo cual ésta estaba muy cerca o mezclada con la experiencia cotidiana inmediata. Con la técnica moderna la situación es diferente, puesto que la innovación es ahora un campo casi exclusivo de expertos, que saben de ciencia y la aplican en los problemas técnicos que abordan. Por ello, aunque la experimentación deliberada se practicó para el desarrollo de los medios técnicos agrícolas tradicionales, su papel no fue tan efectivo, dado que no estaba guiada en explicaciones racionales, por lo cual su alcance fue siempre limitado. Si la explicación de un evento es errónea o incompleta, los experimentos que involucran a dicho evento no tienen una guía confiable y por lo tanto se hacen prácticamente a ciegas, al azar. Con experimentaciones de este tipo es posible entender, al menos parcialmente, porqué las innovaciones y mejoramiento de las técnicas agrícolas tradicionales no pasaron de ser sólo mínimamente funcionales.

2) En el sentido común, explica Nagel, es característico que, si bien la información puede ser exacta, raramente se tiene conciencia de los límites dentro de los cuales la creencia o explicación asumida es válida. En consecuencia, el conocimiento es incompleto. Las habilidades prácticas adquiridas por la tradición y hábitos rutinarios, mantienen su efectividad cuando un conjunto de factores del entorno se mantienen constantes; cualquier cambio en alguno de estos factores a menudo merma en gran medida esta efectividad de la tradición, porque no se tiene conciencia de

sus límites y de las razones de su éxito. El conocimiento técnico tradicional resulta en consecuencia frecuentemente demasiado vago para ser utilizado como guía efectiva para la acción práctica en situaciones nuevas. Por ejemplo, desde el primer siglo antes de Cristo, se comenzaron ya a utilizar ruedas hidráulicas para moler granos, reemplazando a la mano humana en esta función. Pero tuvieron que pasar casi mil años para que estos molinos de agua se utilizaran para otras tareas, tales como los aserraderos, fundiciones y martillos de hierro. Precisamente, en el periodo correspondiente a la técnica tradicional en la agricultura, se aprecia que, con la especialización en la fabricación de herramientas y con la división del trabajo que se observó, el oficio del fabricante de herramientas se convirtió en una actividad casi religiosa, y sus reglas en preceptos casi religiosos, el *hágase de esta manera y no de otra*. El conocimiento práctico acumulado se fue ordenando en reglas de trabajo, reglas técnicas, que se convirtieron en algo así como recetas. Agrega Wartofsky que “todo oficio poseía sus modos de trabajar satisfactorios y sancionados, que eran los que el aprendiz aprendía en forma de reglas, al hacerse con el oficio: la tecnología procedía a base de recetas y perpetuando técnicas tradicionales”.⁵⁷

De esta manera, la tradición conservó estas reglas técnicas. La tradición contribuyó a que el saber práctico llegara hasta nuestros días. Pero el peso de la tradición hace muy difícil los procesos de innovación en la técnica, razón por la cual en casi 5 000 años la técnica agrícola cambió muy lentamente. Y es que, como planteó Ellul, hasta el siglo XVIII todas las civilizaciones se habían orientado hacia un perfeccionamiento del manejo de las herramientas, y muy poco hacia el perfeccionamiento de éstas, lo cual concuerda con la afirmación de Marx, para quien “la mano corregía aquí, más que otra cosa, los errores del instrumento”.⁵⁸ La novedad y la experimentación libre, en un entorno de tradición se ven reducidos a veces drásticamente. En la técnica artesanal (tradicional), reconoce Rapp, las habilidades tradicionales y las reglas empíricas transmitidas son la base, las cuales se han ido conformando a lo largo de periodos de tiempo muy largos. El procedimiento correspondiente al cómo hacer las cosas, que es el problema central de la técnica artesanal, es tan solo el medio para conseguir el fin práctico dado de antemano, pero no es objeto de investigación teórica independiente. Entonces, la búsqueda del porqué un procedimiento es más o menos efectivo prácticamente no existe, ocasionando así que las innovaciones técnicas fueran tan lentas. Por ello, aunque algún grado de experimentación es reconocido en este largo periodo, se comprenden sus limitaciones. El mejoramiento de los utensilios, escaso y lento, procede de la habilidad y del arte personal, y se realiza de una manera “absolutamente pragmática”.⁵⁹

En el Código de Hammurabi existen ya indicios del sistema de transmisión del saber práctico de padre a hijo. En Europa este sistema alcanzó su mayor expresión en el establecimiento de los gremios de artesanos medievales. Un gremio era una asociación entre todos los trabajadores de un mismo oficio en una ciudad. Cada artesano profesional o maestro tenía sus ayudantes, que eran sus aprendices, a quienes se transmitían las enseñanzas del oficio y que con el tiempo podían formar su propio taller como maestros. Maestros artesanos y aprendices eran quienes conformaban el gremio de un determinado oficio. En estas organizaciones, los oficiales gremiales incluso tenían derecho a asegurarse de que todos los productos se fabricaran “según las leyes y ordenanzas del oficio”, con implicaciones de carácter legal para quienes no siguieran las reglas. Dice Huberman que “El jornalero [aprendiz] vivía con el maestro, comía el mismo alimento, estaba educado de la misma manera, creía las mismas cosas y tenía las mismas ideas”.⁶⁰ Este sistema no sólo dificultaba, sino que casi prohiba cualquier intento de innovación técnica. Derry y Williams⁶¹ explican esta situación de la siguiente manera:

Los gremios, fundados en la solidaridad social de todos los maestros artesanos, denunciaban rápidamente a los demasiado ingeniosos por competencia “desleal”, y, si bien no pudieron suprimir totalmente la facultad inventiva, trataron de restringir el uso de cualquier nuevo procedimiento a estrechos límites de espacio y ocupación. En la Edad Media el inventor trabajaba con frecuencia de modo furtivo, como es el caso del alquimista; muchos secretos del oficio se transmitían dentro de una familia; y aquellos inventos que por su naturaleza tenían que ser practicados a la vista de todos, como la utilización del batán, florecieron al principio a una distancia prudencial de la sede del gremio.

Un ejemplo dramático del celo con que los secretos del oficio eran guardados en los gremios es el que expone Huberman.⁶² Se trata de una ley veneciana de 1454, la cual establecía que:

“Si un artesano lleva a otro país cualquier arte o artesanía en detrimento de la República le será ordenado regresar; si desobedece, sus familiares más próximos serán encarcelados, con objeto de que la solidaridad de la familia pueda persuadirle a retornar; si persiste en su desobediencia, se tomarán medidas secretas para matarlo, donde quiera que se encuentre”.

En la Alta Edad Media y durante el Renacimiento, se produjo una serie de inventos mecánicos, basados en la tradición artesanal, sin llegar a la magnitud de los siglos XVIII y XIX. Sobresalió el invento del reloj, así como el desarrollo de nuevos medios técnicos para la manufactura textil. En algunos cultivos de forrajes como la alfalfa se registraron cambios en los métodos de cultivo. Hubo un desarrollo de las técnicas para la construcción de embarcaciones. La industria química también alcanzó un notable desarrollo. La producción industrial y agrícola en Europa se incrementaron en este periodo. Aumentó la cantidad de grano, pescado y ganado.

La industria de la minería y la metalurgia alcanzaron un auge notable debido a la mayor demanda de metales de las nuevas técnicas, sobre todo de la navegación y de la guerra. Durante la Edad media, la minería era practicada por aventureros, que trabajaban solitarios o en pequeños grupos, denominados *mineros libres*, quienes pagaban tributos directamente al rey o al príncipe y eran protegidos por éstos.

En el siglo XV se comenzó a practicar a gran escala, por compañías organizadas. La profundidad de las minas se incrementó, con lo cual se creó la necesidad de desarrollar equipo de bombeo para sacar el agua de los pozos mineros, así como el equipo de acarreo. La experiencia obtenida en la transmisión de fuerza y el bombeo en las minas constituyó un importante punto de partida para el estudio de los principios de la mecánica y la hidráulica por algunos científicos de aquella época. Al mismo tiempo, la manipulación de los metales generó una experiencia importante en el campo de la química. Se desarrollaron métodos para aislar metales de los minerales, así como para combinar diferentes metales durante los procesos de fundición. Todo esto contribuyó a que se fuera consolidando poco a poco una teoría química.

La transmisión de fuerzas por medio de correas, producto de esta época, tuvo una gran importancia para el desarrollo de las máquinas del siglo XVIII. En los tiempos de Galileo en el siglo XVII, cuando la ciencia moderna empezaba a manifestarse, la técnica artesanal continuó basándose en las habilidades tradicionales y en las reglas empíricas transmitidas, conformadas a lo largo de un prolongado desarrollo, cuya eficacia práctica tenía que ser demostrada siempre de nuevo. La ciencia no influyó en la técnica artesanal por diversas razones, como se explica en el capítulo III.

El peso de la tradición en la agricultura, según Derry y Williamas, era incluso mayor que en la industria. La agricultura tradicional es típicamente de subsistencia, es decir, casi completamente para autoconsumo, con un escaso excedente para intercambiar por mercancías. Esta agricultura de subsistencia tenía tal tradición, que cualquier intento de hacer cambios sustantivos en sus métodos debía enfrentar a presiones sociales considerables. Estos mismos autores exponen que:

En la agricultura, en un grado mayor que en la mayoría de las industrias, las presiones sociales tendían a mantener métodos tradicionales. La agricultura de subsistencia era una forma de vida autárquica, cuyo derrocamiento era a menudo más difícil que la sustitución de la mano de obra por maquinaria en una industria establecida. Los grandes campos abiertos, divididos en pequeñas parcelas y cultivados de acuerdo con la habitual rotación de tres años (o de dos años), eran un rasgo característico de la vida rural medieval, que tenía unas raíces sociales muy profundas y que no podía ser eliminado en ningún sitio sin grandes trastornos.⁶³

Cuando los conocimientos y procedimientos científicos se incorporaron al conocimiento técnico acumulado, la tradición perdió fuerza. La transmisión del conocimiento técnico deja de ser personal, deja de pasar de una generación a otra a través del binomio maestro artesano-aprendiz. Los gremios poco a poco van desapareciendo para dar lugar a los grandes talleres, que luego pasaron a ser fábricas, dentro de las cuales se comenzaron a incorporar los conocimientos y métodos de las ciencias naturales y las matemáticas. Los principios de la técnica ahora están disponibles para una enorme cantidad de personas, el acceso al conocimiento se vuelve mucho más fácil, las reglas del *cómo hacer* ahora pueden

ser y son cuestionadas. La innovación en la técnica se aceleró en los siglos XIX y XX como nunca antes. Con la ciencia, ahora en la técnica se comienza a superar la mínima funcionalidad y se busca sistemáticamente la elevación de los niveles de funcionalidad.

III. INICIOS DE LA MECANIZACION AGRICOLA: PERIODO DE TRANSICION

Desde la época de Mesopotamia, alrededor de 3 000 años antes de Cristo, cuando se comenzó a utilizar la fuerza animal para labores agrícolas muy incipientes, la técnica agrícola cambió muy poco hasta el siglo XVIII. A partir de entonces, en Europa occidental, y luego en Estados Unidos, y en el entorno de la revolución industrial, los métodos y medios para la producción de alimentos elevaron como nunca antes la producción agrícola. A la vez que una gran variedad de nuevos instrumentos y máquinas agrícolas fueron desarrollados, estrechamente relacionados con el desarrollo industrial de la época, se obtuvieron mejores variedades de plantas y animales, se introdujeron los abonos artificiales y nuevos métodos de control de plagas y enfermedades de los cultivos agrícolas. En el campo de las herramientas para el trabajo, se inició lo que propiamente se conoce como la mecanización de la agricultura, es decir, la utilización intensiva de la fuerza mecánica para las labores agrícolas, abriendo la posibilidad de la sustitución de la fuerza muscular humana y animal para estos propósitos.

La técnica agrícola ha cambiado sustancialmente desde finales del siglo XVIII, en un proceso que continúa hasta nuestros días. El camino de la mecanización agrícola, desde sus inicios en el siglo XVIII, hasta el siglo XX, comprende dos etapas identificables:

- 1). Desarrollo de herramientas agrícolas para tracción animal. Aunque más funcionales que los equipos tradicionales de la antigüedad, este tipo de artefactos, que incluye arados, sembradoras, segadoras, cultivadoras, desterronadoras, etc., son aún construidos por inventores empíricos, ideados casi exclusivamente sobre la base del saber técnico tradicional. Esta etapa se ubica entre finales del siglo XVIII y finales del XIX. Es una etapa de transición entre la técnicas tradicional y la tecnología moderna, y es fruto de una gran cantidad de inventores empíricos. Esta etapa de transición es la que se aborda en este capítulo.
- 2). Desarrollo de máquinas y equipo agrícola autopropulsados, primero por adaptaciones de la máquina de vapor, y luego del motor de combustión interna, que al principio fue de keroseno y gasolina, y después fue predominante el de diesel. El tractor agrícola se convirtió en la expresión clásica de la mecanización agrícola moderna, basada en una mezcla del saber técnico tradicional y del conocimiento científico disponible. Esta técnica agrícola, que ha iniciado al final del siglo XIX, y que continúa hasta nuestros días, es ya producto de la ingeniería agrícola. En este trabajo se le denomina a ésta como la etapa de la tecnología agrícola moderna. Esta etapa del desarrollo de la mecanización agrícola se aborda en el capítulo siguiente.

No es posible aislar el surgimiento de la tecnología agrícola del entorno de la revolución industrial en el cual se desarrolló. De hecho, algunos autores, como John D. Bernal, hablan de una revolución agrícola paralela a la revolución industrial. Estas dos revoluciones sin embargo (agrícola e industrial) no fueron producto de la ciencia, ni fueron iniciadas por ella. En realidad, la ciencia se incorporó a los procesos de producción agrícola e industrial cuando ya se habían llevado a cabo una gran cantidad de innovaciones técnicas en base, casi exclusivamente, al saber práctico tradicional. Las innovaciones técnicas a gran escala, tanto en la agricultura como en la industria, comenzaron en el siglo XVIII, mientras que la aplicación de la ciencia a este tipo de problemas, también a gran escala, ocurre hasta finales del siglo XIX, y se consolidó hasta el siglo XX. Braverman⁶⁴ resumió esta situación de la siguiente manera:

En contraste con la práctica moderna, la ciencia no abrió el camino sistemáticamente a la industria, sino que a menudo fue arrastrada y creció a partir de las artes industriales. En lugar de formular visiones significativamente frescas acerca de las condiciones naturales en una forma que hiciera posible nuevas técnicas, la ciencia, en sus orígenes bajo el capitalismo [refiriéndose a la situación de los siglos XVII, XVIII y XIX], a menudo formuló sus generalizaciones al lado de o como un resultado del desarrollo tecnológico.

A mediados del siglo XVIII se registran en Gran Bretaña una serie de innovaciones técnicas en la industria textil y mejoras en la máquina de vapor (que había sido inventada en 1698), un incremento notable en la metalurgia en Escocia y sur de Gales, y el inicio de la construcción una red de canales inglesa. Todo esto, junto a una serie de condiciones económicas, sociales y políticas propicias, fomentó en Gran Bretaña primero, y luego en Europa continental y Estados Unidos, la expansión acelerada de la industria que se conoce como revolución industrial, que alcanzó su mayor notoriedad en el siglo XIX. Las invenciones de los maestros manufactureros aumentaron en tal cantidad, que el número de patentes se multiplicó casi por seis entre 1750 y 1780 en Gran Bretaña.⁶⁵

La invención de los medios técnicos, así como el mejoramiento de aquellos que permitieron el aumento sin precedentes en los parámetros de la producción industrial en el siglo XVIII, fueron al inicio obra casi exclusiva de la tradición artesanal, de los maestros artesanos. Sólo hasta mediados del siglo XIX la aplicación de la ciencia se hizo notoria, en pleno auge de la expansión industrial y en una etapa ya casi completamente mecanizada de los procesos de producción, tanto industriales como agrícolas. La ciencia se comenzó a relacionar con los problemas prácticos en los campos de la mecanización, la química y la electricidad; después, hasta el siglo XIX, se infiltró prácticamente en todas las áreas productivas. Bernal⁶⁶, al referirse al proceso de vinculación de la ciencia con los problemas productivos, lo planteó de la siguiente manera:

Durante el siglo XVII se habían resuelto los problemas griegos utilizando los nuevos métodos matemáticos y experimentales. En cambio, los científicos del siglo XVIII emplearon estos métodos para resolver problemas que los griegos jamás se plantearon. Además lograron que la ciencia quedara integrada firmemente al mecanismo

productivo. A través de la ingeniería mecánica, de la química y de la electricidad, la ciencia fue desde entonces indispensable para la industria. El primer paso en este sentido se había dado en el siglo XVII, con las aportaciones hechas por la ciencia a la astronomía en beneficio de la navegación... En realidad [la ciencia] no había hecho contribución alguna a la industria. En contraste con esto, en el transcurso del siglo XIX la ciencia, sin perder su carácter académico, se convirtió en uno de los principales elementos dentro de las fuerzas productivas de la humanidad.

Las investigaciones científicas se habían ya reorientado más hacia los problemas físicos que a los metafísicos desde los siglos XVI y XVII, desarrollando los métodos de observación cuidadosa de los fenómenos naturales y expresando las relaciones causales en función de parámetros medibles, en términos matemáticos. Desde inicios del siglo XVI algunos filósofos mostraron interés por los procesos de fabricación y en general por las llamadas artes útiles. Así por ejemplo, Luis Vives escribía en 1531 que debía emprenderse, por parte de los científicos, el estudio serio de artes como la cocina, la construcción, la navegación, la agricultura y la sastrería, exhortando a los científicos a no menospreciar a los obreros manuales ni avergonzarse de solicitar de ellos la enseñanza de su oficio.⁶⁷

Algunos científicos de aquella época, interesados en la explicación de problemas técnicos, comenzaron a aplicar las matemáticas para la descripción de un conjunto de fenómenos naturales implicados en ellos. Por ejemplo, Leonardo Da Vinci (1452-1519) hizo importantes observaciones que representaron aportaciones a la mecánica y la hidráulica. Aunque no dominaba realmente las matemáticas, indicó el valor que tendrían para las investigaciones técnicas cuando escribió que: “la mecánica es el paraíso de la matemática, porque nos da los frutos de esta ciencia”.⁶⁸ Al tratar de construir un pájaro mecánico, Da Vinci combinó una aguda observación del vuelo de las aves con la construcción de modelos teóricos, cálculos y ensayos experimentales, estableciendo así precedentes del moderno método de diseño en la ingeniería (ver cap. VI). En sus trabajos, teóricos y experimentales, Da Vinci desarrolló una teoría sobre las poleas y otras aplicaciones mecánicas. En hidráulica reconoció los principios fundamentales de que los líquidos transmiten presión y que el trabajo realizado por un motor equivale al realizado por la resistencia. Galileo Galilei (1564-1642), considerado como uno de los precursores más importantes del científico moderno, estableció una teoría matemática del movimiento. Antes de él, sólo Nicolás Copérnico (1473-1543) había expresado el comportamiento de algún evento físico en términos matemáticos. Galileo estableció los fundamentos de la estática y la dinámica, y elaboró la teoría matemática de la resistencia de materiales en base a sus discusiones con los maestros constructores de navíos.⁶⁹

Sin embargo, a pesar de que muchos otros científicos se involucraron en la explicación de un buen número de problemas físicos, muy pocos de ellos se involucraron directamente en la solución de

problemas prácticos. La ciencia de los siglos XVI y XVII, y en gran parte la del siglo XVIII, permaneció en general ajena aún a los problemas prácticos. Por ejemplo, en el siglo XVIII, un gran cantidad de matemáticos se dedicaron a resolver una gran cantidad de problemas de la mecánica, pero en un sentido estrictamente teórico. Hankins⁷⁰ expuso la situación de la siguiente manera:

El cálculo [diferencial e integral] había sido creado para abordar el problema del movimiento, y las nuevas técnicas matemáticas descubiertas en el siglo XVIII eran todas ellas respuestas a los retos de la mecánica... Los problemas físicos a los cuales se aplicaba el cálculo no se referían normalmente a la mecánica práctica, la cual era todavía cosa de artesanos. En vez de esto, los matemáticos se dedicaban a la "mecánica racional", en la cual el objeto físico se reducía a unas pocas propiedades idealizadas susceptibles de ser cuantificadas. Esto no quiere decir que los matemáticos no hicieran uso de los problemas prácticos. Leonhard Euler, el mayor analista de la ilustración, creó teorías matemáticas para predecir el pandeo de pilares y las vigas; diseños óptimos para cascos de buques, velas y anclas; una teoría de las lentes anacromáticas; teorías para describir los movimientos de las cuerdas vibrantes y las planchas metálicas; diseños para ruedas hidráulicas y turbinas; y un sinfín de otras aplicaciones, pero su orientación siguió siendo matemática y teórica.

Muchos de los resultados de aquellos trabajos hoy en día son temas de estudio de la ingeniería moderna, como parte de la formación profesional de los ingenieros contemporáneos. Pero en aquellos días nada tenían que ver con la solución de problemas técnicos inmediatos, porque no había forma de pasar de la teoría a la práctica. Fue hasta finales del siglo XIX en adelante, cuando la complejidad de las nuevas máquinas exigió niveles mayores de precisión, cuando estos resultados se llevaron a la práctica, al diseño de máquinas reales (ver sec. IV.1).

Es por ello que prácticamente todos los desarrollos técnicos de aquella época, que caracterizan la revolución industrial, fueron obra de la tradición, del saber práctico de los artesanos y obreros. Bernal⁷¹ señaló al respecto que:

La mayor parte de los ingenieros de la Gran Bretaña [de los siglos XVIII y XIX], que durante mucho tiempo fue el centro de la revolución industrial, fueron en un principio simples obreros, hábiles y ambiciosos, pero generalmente ignorantes o autodidactos. Algunos fueron constructores de molinos, otros fueron mecánicos y otros fueron herreros... Las tendencias de toda la revolución industrial fueron la invención de mecanismos cada vez más ingeniosos y el perfeccionamiento constante de las máquinas y las estructuras. Sólo cuando se implicaban nuevos principios físicos, como ocurrió al principio con las nuevas máquinas térmicas y eléctricas, no era mucho lo que se requería de la ciencia.

La invención de máquinas para construir máquinas, denominadas máquinas-herramienta y la producción de metales, ambas en el siglo XIX y antecedentes indispensables para el desarrollo de todo tipo de máquinas e instrumentos, incluyendo desde luego las máquinas agrícolas, fueron dos de las áreas de desarrollo técnico que más contribuyeron a la revolución industrial. Ambas fueron desarrolladas sobre la base del saber técnico tradicional, casi ajenas a la ciencia. Incluso a pesar de que las máquinas-herramienta como los tornos, fresadoras y taladros alcanzaron una notable precisión en la construcción de piezas metálicas, tuvieron muy poco que ver con la ciencia. Bernal añadió que sólo cuando la precisión alcanzada por las máquinas fue lo suficientemente elevada, se pudo aplicar la

mecánica de Newton para calcular de antemano la fabricación de piezas con suficiente aproximación. Para el caso concreto de la producción de metales, este autor señaló que: “Como ocurrió con el caso de la construcción de máquinas, la revolución metalúrgica debió mucho más a los hombres prácticos que a la ciencia, hasta el momento decisivo en que se necesitó producir acero en gran escala, a finales del siglo XIX.”⁷² La industria química y la electricidad son sin embargo casos de la técnica que, desde sus inicios, estuvieron ligadas a la ciencia.

La unión entre la ciencia y el saber técnico tradicional fue un proceso gradual. Científicos y artesanos comenzaron a mezclarse en los problemas productivos. Bernal⁷³ describió así este proceso:

En cada una de las etapas del desenvolvimiento de la maquinaria y la metalurgia, los artesanos trataron febrilmente de inventar nuevos artificios y de adquirir todos los conocimientos científicos que podían utilizar. Por su parte, los hombres de ciencia se preocuparon por aprender los oficios mecánicos, para poder comprender los principios en que se fundaban.

Para mediados del siglo XIX la ciencia estaba ya tan involucrada en los problemas técnicos, que según este mismo autor, el incremento de las aplicaciones científicas para entonces fue mucho más rápido que el crecimiento de la ciencia misma,⁷⁴ y en otro pasaje, el autor señaló que solamente a mediados del siglo XIX fue cuando las tareas de la ingeniería empezaron a superar la escala de los recursos utilizados por los antiguos.⁷⁵

En el siglo XIX, la población europea aumentó en 200 millones, un aumento sin precedentes. Al mismo tiempo, menos gente estaba dedicada a producir directamente alimentos, lo cual contribuyó a alentar el aumento de la producción agrícola. La mecanización agrícola contribuyó en gran medida a aumentar la eficiencia del trabajo agrícola, en un proceso que se inició desde el siglo XVIII, como una de las primeras fases de la revolución industrial.

La mecanización de la agricultura se propició en buena medida por el mismo desarrollo industrial. Por ejemplo, la producción barata de metales de uso industrial como el hierro colado y el acero, así como el desarrollo de medios de transporte más accesibles y económicos, como la locomotora y el buque de vapor, facilitaron e incentivaron la producción de alimentos y la mecanización de los procesos. La construcción de máquinas y herramientas agrícolas se elevó a niveles industriales, pues dejó de ser una actividad artesanal, la cual era lenta y costosa en relación con la capacidad de producción de las nuevas compañías de maquinaria agrícola. La producción artesanal de las herramientas agrícolas tradicionales comenzó a quedar rebasada en el siglo XVIII. Bernal⁷⁶ comentó que:

La metalurgia del hierro y el acero se habían venido practicando como artesanía desde unos 3 000 años atrás, por lo menos. La destreza de los herreros medievales, tanto en oriente como en occidente, difícilmente podía ser

superada. Pero sus productos, hechos enteramente a mano, eran costosos y en cantidad limitada a la satisfacción de las demandas enteramente estáticas de hachas, herraduras, rejas de arado, armas y armaduras.

Mientras que Derry y Williams⁷⁷ han añadido que:

Quando el hierro colado llegó a estar al alcance de todos, la fabricación de utensilios agrícolas dejó de ser monopolio virtual de los carpinteros y herreros locales, pudiendo ser adquirido equipo eficiente en gran escala a los fabricantes de maquinaria agrícola.

La agricultura, al igual que la industria, mejoró sus parámetros productivos y sus métodos durante la revolución industrial, más bien por el mejoramiento de las técnicas tradicionales, de manera empírica, que como resultado de la aplicación de la ciencia. En la mecanización agrícola, los primeros y novedosos equipos, tales como arados, sembradoras y segadoras fueron obra de hombres prácticos, y no de quienes aplicaban la ciencia. Derry y Williams⁷⁸ han descrito esta situación de la siguiente manera:

Podemos, pues, decir con toda certeza que hasta muy cerca del final del siglo XIX las técnicas agrícolas, incluso más que las empleadas en la industria, estaban siendo mejoradas empíricamente como resultado de la experimentación llevada a cabo por agricultores y fabricantes, más que como resultado de nuevas investigaciones científicas.

Sin embargo, hubo intentos tempranos, en el siglo XVIII, de promover una agricultura basada en principios científicos, como cuando Lavoisier (1743-1794) fundó, en 1778, una granja modelo en Fréchines, en donde duplicó la producción de trigo en diez años. En 1803, Sir Humphrey Davy (1778-1829), a petición de la *Royal Institution*, pronunció en aquella sociedad científica una serie de conferencias sobre química agrícola. Destaca el papel que jugó Jethro Tull, un agricultor que introdujo métodos científicos de cultivo, en un intento por acabar con las prácticas agrícolas tradicionales antieconómicas. En 1701 inventó una sembradora de maíz para introducir semillas en surcos, con lo cual se pudieron utilizar arados pequeños para labores continuas después de la siembra. Con este sistema, Tull mantuvo durante todo el ciclo de cultivo a las plantas libres de malezas y con un suelo suelto, con lo cual logró que el trigo creciera por encima de la media, empleando tan sólo un tercio de las semillas comúnmente utilizadas. Los surcos rectos de los campos agrícolas modernos, con niveles mayores en productividad que la siembra al voleo, fueron introducidos por Jethro Tull. Con sus métodos, este personaje triplicó la productividad del trigo con respecto a la Edad Media.⁷⁹

La revolución agrícola que acompañó a la revolución industrial, nació en Gran Bretaña. En particular, a finales del siglo XVIII se da una gran diversificación de los instrumentos agrícolas. Se comienzan a desarrollar aperos sobre todo de hierro, desplazando a la madera y la piedra como materiales típicos en su construcción. Bairoch⁸⁰ ha señalado que el paso de los aperos agrícolas de madera al hierro, fue uno

de los factores que contribuyeron al desarrollo industrial de países como Gran Bretaña, y Tortolero⁸¹ agrega que la agricultura inglesa entre 1720 y 1770 demandó entre el 25 y 50% del hierro total consumido por todo el país.

Después de 1750, los métodos y medios técnicos de la agricultura inglesa se separaron cada vez más del sistema medieval tradicional, caracterizado por una agricultura básicamente de subsistencia, es decir, para autoconsumo, y en donde se aprovechaban como máximo dos terceras partes del rendimiento del terreno, ya que éste permanecía en barbecho uno de cada tres años. El barbecho consistía en dejar descansar el terreno, dejando crecer la vegetación para luego incorporarla todavía verde al subsuelo, con el propósito de evitar el empobrecimiento nutricional del mismo para los cultivos. El rompimiento con la tradición de las técnicas ancestrales en la agricultura fue más difícil que en la industria, como lo han apuntado Derry y Williams.⁸²

En la agricultura, en un mayor grado que en la mayoría de las industrias, las presiones sociales tendían a mantener métodos anticuados [tradicionales]. La agricultura de subsistencia era una forma de vida autárquica, cuyo derrocamiento era a menudo más difícil que la sustitución de la mano de obra por maquinaria en una industria establecida.

A finales del siglo XVIII, una serie de modificaciones transformaron los antiguos arados de madera en arados de hierro en Gran Bretaña, y se le agregaron un conjunto de mejoras en sus partes, introduciendo alambres y clavos metálicos para ensamblar sus componentes. Antes, estas uniones se hacían con correas de cuero, o con clavos de madera. También en esa época, y a principios del siglo XIX se registraron una serie de inventos mecánicos para las labores de siega de cereales y la separación de granos como el trigo y el maíz. Por ejemplo, la figura 10 muestra una segadora de maíz de 1780, empujada por caballos. Inventos como éstos fueron comunes en la Gran Bretaña de aquella época, y tenían por características el uso del hierro en su construcción y su accionamiento por la fuerza muscular animal, principalmente caballos y mulas.

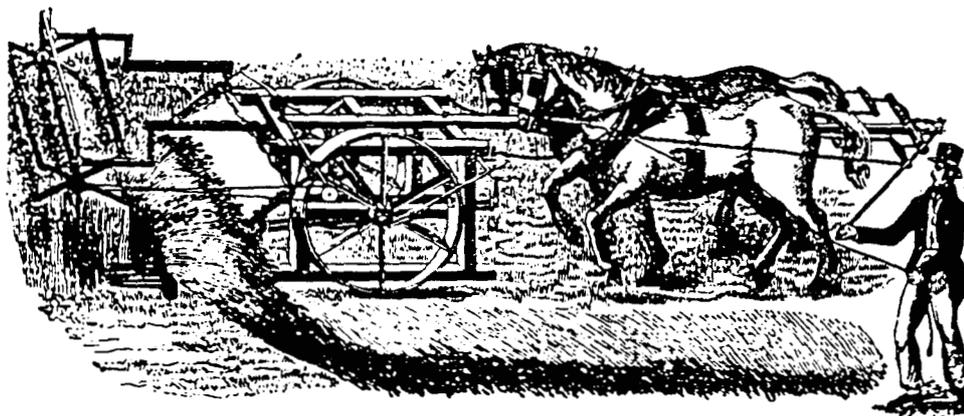


Figura 10. Segadora de maíz empujada por caballos, de 1779. Fuente: Derry, T. K., y Williams, T. I., *Historia de la tecnología*, vol. 3, pág. 990.

Para ayudar a sustituir los métodos y técnicas tradicionales, se fundaron en aquella época (finales del siglo XVIII) en varios países de Europa una serie de sociedades agrícolas, con propósitos propagandísticos sobre las nuevas técnicas, así como para estimular la innovación técnica. Por ejemplo, en Gran Bretaña fue fundada, en 1754, *The Society for Encouragement of Arts, Manufactures and Commerce*, que se encargó de promover el desarrollo agrícola (entre otros sectores técnicos) hasta la fundación de la *Royal Agricultural Society*, en 1838. Antes, en 1793 había sido creada la Dirección de Agricultura. La *Royal Agricultural Society* proclamó que su propósito era “fomentar la alianza entre los granjeros y los hombres del capital y de la ciencia”.⁸³ Durante sus primeros 22 años de existencia, la Society of Arts entregó 16 625 libras esterlinas en premios a la invención de diversos dispositivos mecánicos que jugaron un papel importante en las revoluciones industrial y agrícola. Otras sociedades formadas para propósitos similares fueron la Real Sociedad Agrícola de Dinamarca, en 1769, y la Sociedad de Filadelfia para promocionar la Agricultura, en 1785, que entre sus miembros contaba con Benjamin Franklin (1706-1790), conocido por su destacado papel como político, científico e inventor.

Aún cuando la mecanización agrícola comenzó en Inglaterra, a finales del siglo XIX Estados Unidos se convirtió en el centro de desarrollo predominante en este campo técnico. Diversos factores contribuyeron a ello. Destaca la amplitud de la superficie agrícola cultivada, la cual entre 1860 y 1900 se estima en más de 160 millones de hectáreas, equivalente a más de diez veces la superficie cultivada y no cultivada, de Inglaterra y Gales.⁸⁴ El conocimiento de la experiencia europea, sobre todo de Inglaterra, se difundió ampliamente en Estados Unidos durante todo el siglo XIX mediante la prensa agrícola, las reuniones de las sociedades agrícolas y por los propios inmigrantes. Aunque el desarrollo de la ingeniería mecánica alcanzó en Estados Unidos un estado en el cual la mecanización agrícola elevó sus parámetros de funcionalidad en el siglo XX, en sus inicios su situación fue similar a la de Inglaterra; es decir, consistió en el desarrollo de implementos y máquinas agrícolas para tracción animal, sobre una base de conocimiento empírico.

Las mejoras en los implementos agrícolas de finales del siglo XVIII se multiplicaron. Flin,⁸⁵ describió en 1872 un ejemplo de esta situación, refiriéndose a las innovaciones de la técnica agrícola norteamericana, de la siguiente manera:

Los perfeccionamientos del arado habían empezado antes de terminar el pasado siglo. Se había concedido una patente a Charles Newbold de Burlington, Nueva Jersey en 1797 para un arado de hierro fundido que combinaba el vertedero, la reja y la parte baja todo fundido junto y fue considerado por los fabricantes de arados más inteligentes como un adelanto tan grande que Peacock, en su patente de 1807, pagó al inventor original la suma de 500 dólares por el derecho de combinar ciertas partes del arado de Newbold con el suyo propio. La importancia de esta máquina fue tan grande que llamó la atención de los hombres de ciencia, los cuales intentaron mejorar su forma y construcción y en 1798 Thomas Jefferson se dedicó a esta tarea, escribiendo un tratado sobre la forma requerida

por el vertedero del arado, de acuerdo con principios científicos calculando la forma y el tamaño exactos y especialmente la curvatura para mitigar la fricción.

Agregaba Flint que, mientras cincuenta años atrás el arado se fabricaba en ocasiones en la misma granja, a cargo del herrero y del operador, "ahora [1872] este trabajo se lleva a cabo en unos pocos establecimientos", es decir, en fábricas, con un cierto grado ya de especialización. Otro autor, Danhof,⁸⁶ ha señalado refiriéndose a tal situación que: "En los 40 años siguientes a 1820, la tecnología de la agricultura se vió revolucionada por la aparición afortunada o más eficaz de la energía mecánica a todas las tareas fundamentales de la agricultura."

Es de notar que ya en el siglo XVIII había algunos científicos tratando de aplicar la ciencia a algunos problemas prácticos de la mecanización agrícola, aunque en aquel tiempo era más bien una rareza que una situación generalizada. La ciencia estaba aún lejos de las concepciones de los agricultores. Por ejemplo, el arado de Newbold no se difundió con rapidez porque muchos granjeros pensaban que envenenaba el suelo. Fue hasta alrededor de 1830 que este tipo de arados era ya ampliamente utilizado.

En 1833 se patentaron en Estados Unidos, algunas segadoras-trilladoras de cereales, también tiradas por caballos. Este tipo de máquinas implican una complejidad mayor en relación a los implementos anteriores, dado el mucho mayor número de partes móviles y la forma geométrica más compleja de las mismas, así como requerimientos de precisión mayores en cuanto al funcionamiento. Esto significa que la experiencia técnica de los constructores de maquinaria, ajenos aún en su mayoría a la ciencia, seguía creciendo y produciendo equipo de cada vez mayor diversidad y precisión, lo cual fue una condición indispensable para poder aplicar satisfactoriamente la ciencia al diseño y construcción de máquinas y procesos, tanto industriales como agrícolas. Esta experiencia técnica se advierte en el crecimiento del número de patentes para aparatos agrícolas registrados a mediados del siglo XIX. Así, en 1848 se registraron 33 patentes de este tipo, incluyendo implementos y máquinas como arados, extirpadores, sembradoras, cortadoras de grano y hierba, rastrillos y desgranadoras de maíz. Para 1860 se registraron 917 patentes de aparatos agrícolas con una variedad tan amplia que incluía artefactos para elaborar mantequilla, empacadoras de algodón, extirpadores, mantequeras, desgranadoras de maíz, cubiertas para caña, aparatos para evitar que los caballos se acercaran al pesebre, cortadores de tallos de maíz, desmontadoras de algodón, trituradoras de azúcar, limpiadoras, secadoras y pulidoras de café, limpiadoras de arroz, sembradoras, máquinas para abrir zanjas y para colocar drenajes de tejas, evaporadoras de sacarina, elevadoras de heno, cortadoras de forraje, fertilizadoras, una máquina para fabricar postes de cercas, y otra para afilar estos postes, máquinas para limpiar la semilla de algodón,

agavilladoras, limpiadoras de granos, cosechadoras, trilladoras, un dispositivo para evitar que los puercos hocen, espadillas para el cáñamo, molinos de maíz, descascaradores de arroz, máquinas para segar césped; molinos de sidra, de café y de harina; arados, plantadoras, prensas de algodón, prensas de queso, cosechadoras combinadas de cereales, rastrillos de tracción animal, máquinas sembradoras, hornos para evaporar azúcar, extractores de tocones, separadores de granos, máquinas aventadoras y trilladoras, máquinas para esquila lana, para pesar granos, etc.⁸⁷ Para 1899 las ventas anuales de maquinaria agrícola alcanzaron los 101 millones de dólares en Estados Unidos, en comparación con los 7 millones de dólares de cincuenta años antes.⁸⁸ Todas estas máquinas eran accionadas manualmente o por caballos, la mayoría de este último tipo, en unidades estacionarias. Las figuras 11 muestra uno de los artefactos agrícolas típicos de aquella época, accionado por caballos, y estacionario.

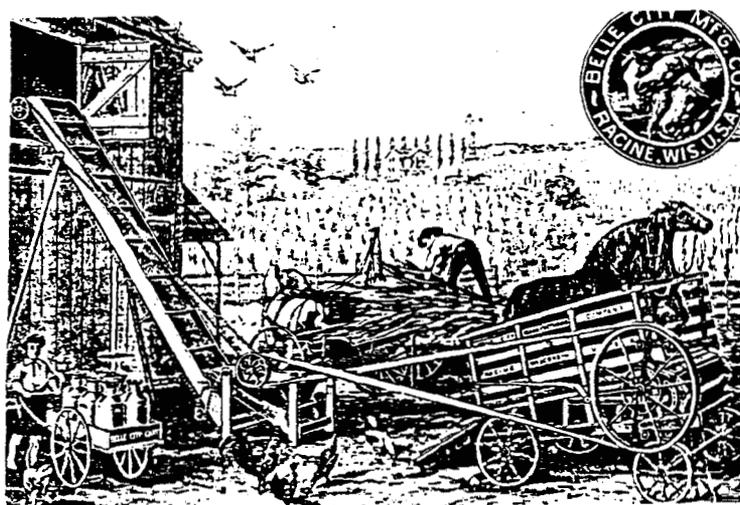


Figura 11. Cortador y ensilador de forraje estacionario. Fuente: Mills, Robert K., *Implement and tractor: reflections on 100 years of farm equipment*, pág. 35.

Aún cuando la ciencia “llegó tarde” a la revolución técnica de los siglos XVIII y XIX, su efecto fue la elevación de la funcionalidad a niveles mucho mayores que aquellos que el saber técnico tradicional había podido generar. La enorme variedad de nuevos medios técnicos, así como el uso de nuevos materiales metálicos que caracterizaron esta época fecunda en invenciones técnicas para la agricultura, fueron producto de hombres ajenos casi por completo a la ciencia, salvo raras excepciones. Pero todas estas innovaciones fueron el precedente necesario para la posterior unión entre dos tipos de conocimiento que habían venido evolucionando por separado el conocimiento técnico tradicional y el científico, sobre todo de las ciencias naturales y las matemáticas. Y así, desde mediados del siglo XIX en adelante, la mezcla de saber técnico tradicional y conocimiento científico fue sistematizada en una nueva profesión: la ingeniería moderna, cuyo propósito es la solución de problemas prácticos y

técnicos utilizando ambos tipos de conocimiento. En el caso de la mecanización de las labores agrícolas, esta unión se dio hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

IV. LA MECANIZACION EN LA TECNOLOGIA AGRICOLA MODERNA

A mediados del siglo XIX se comienzan a utilizar las máquinas de vapor para llevar a cabo las labores agrícolas. Se trataba de máquinas que aún dependían en cierto grado de la fuerza animal para ser transportadas de un lugar a otro. Para finales del siglo, éstas máquinas ya eran independientes de cualquier otra fuente de potencia externa, es decir, eran autopropulsadas, y fueron el inicio de una nueva forma de mecanización agrícola que aún hoy continúa. A partir de las máquinas de vapor se desarrollaron los tractores con motor de combustión interna. Se trata de una nueva etapa en la técnica agrícola, dado que los desarrollos técnicos comienzan a basarse en el saber técnico tradicional y en la ciencia, sobre todo las ciencias naturales. Los nuevos técnicos, ahora ingenieros egresados de las universidades, basan sus diseños en las ciencias de la ingeniería moderna. Por ello, desde finales del siglo XIX se puede hablar ya de una tecnología agrícola moderna, de la cual el tractor agrícola se convirtió en el siglo XX en la vía de la nueva mecanización agrícola.

IV.1. Máquinas de vapor en la agricultura

Desde principios del Siglo XIX hubo intentos aislados para introducir la máquina de vapor a la agricultura. En 1801, Pratt, en Inglaterra, construyó un arado que era tirado por medio de cables desde los extremos del terreno de cultivo, con una máquina de vapor en cada uno de los dos extremos. Este sistema fue mejorado hasta 1850 en Inglaterra y Alemania.

La sustitución de la fuerza motriz animal por las máquinas de vapor a gran escala se inició en 1840, cuando en Inglaterra, una locomotora de vapor fue adaptada para la trilla de cereales. Esta máquina permanecía estacionaria. Para 1850 ya se habían desarrollado tractores de vapor en Estados Unidos, cuya única función era tirar de grandes implementos como los arados. A partir de entonces, se comenzó a construir una amplia variedad de máquinas de vapor específicamente para algunas labores agrícolas, por ejemplo: cultivadores, segadoras, trilladoras y arados. Al principio, todas estas máquinas eran estacionarias, teniendo incluso que ser tiradas por caballos para transportarlas de un lugar de trabajo a otro. Para la década de 1870, muchas máquinas de vapor ya eran autopropulsadas, es decir, ya no necesitaban de ninguna otra fuente externa de energía para trabajar o transportarse. En 1890, en Estados Unidos se construyeron alrededor de 3 000 tractores de vapor y un número similar de trilladoras, también accionadas por vapor.⁸⁹ Estas máquinas incorporaron una gran cantidad de

dispositivos como embragues, frenos, engranes y sistemas de dirección para las ruedas delanteras. Todo esto significó un aumento de la complejidad, dado que estas nuevas máquinas tenían ahora un número mayor de partes móviles y mayores requerimientos de precisión en su fabricación y funcionamiento, que sus antecesoras de tracción animal. La complejidad llegó a tal grado que con frecuencia estas enormes máquinas pesaban más de 11 toneladas, y se requerían 10 o más hombres para operarlas. Por ejemplo, un tipo común de trilladoras de vapor necesitaba de dos hombres para conducirla, dos para abastecerla de carbón y agua, dos para manejar el mecanismo trillador, uno para acercar agua y varios hombres más para llevar los manojos del cultivo a la máquina⁹⁰ (en este caso era una máquina estacionaria). Se llegaron a construir máquinas vapor de hasta 41 toneladas de peso. Además, dada la complejidad estas máquinas se volvieron peligrosas para quienes las operaban. Si el suministro de agua o el mantenimiento y operación no eran las adecuadas, estas máquinas se incendiaban, e incluso llegaban a explotar, con lo cual causaron la muerte de un buen número de personas y un número mayor de heridos. Por ello, se requería una persona altamente capacitada –denominada el “ingeniero de la máquina”– para operar estas máquinas. Además, estas máquinas eran bastante costosas para el promedio de los granjeros. Sin embargo, representaron muchas innovaciones técnicas que después fueron incorporadas al tractor de gasolina que las reemplazó, y que se convirtió en el eje de la mecanización de la agricultura en el siglo XX.

Para 1910 el uso de máquinas de vapor en la agricultura alcanzó su apogeo,⁹¹ luego comenzaron a ser desplazadas por los tractores de gasolina, y para 1914 ya estaban en franco proceso de obsolescencia.⁹² Con los tractores de gasolina se introdujo un nuevo tipo de motor a las labores agrícolas: el motor de combustión interna, cuyo diseño estaba ya basado en los principios científicos de la termodinámica – que hoy es una de las ciencias de la ingeniería de mayor utilidad–, obtenidos del estudio teórico de la máquina de vapor, y en parte de las leyes de conservación de la energía.

Sin embargo, en lo que concierne a la innovación técnica del siglo XIX, todo indica que fue un periodo más bien de transición en lo que a la incorporación de la ciencia a los asuntos técnicos se refiere. Al respecto, Bernal⁹³ apuntó que:

En los países con una producción y una agricultura mecanizada...la transformación técnica del siglo XIX fue más notable en cantidad que en calidad. La aportación fundamental de la revolución industrial, la utilización de máquinas impulsadas por fuerza motriz en sustitución de la mano de obra artesana, había tenido lugar en el siglo XVIII. Lo que caracteriza al siglo XIX es la enorme expansión lograda por estas máquinas y el constante incremento de su rendimiento y su baratura.

Ya ha quedado asentado que en este periodo hubo un aumento sin precedentes en cantidad y variedad de invenciones mecánicas para las labores agrícolas, sobre todo en Estados Unidos, donde las ventas

anuales de maquinaria agrícola alcanzaron los 101 millones de dólares en 1899, en comparación con los 7 millones de dólares de cincuenta años antes.⁹⁴

A finales del siglo XIX sobre todo, los inventores hacían ya uso de algunos conocimientos científicos, si bien no en forma sistemática. Todavía sus invenciones eran obras basadas en el saber tradicional, heredado de los herreros y carpinteros en su mayoría, y de la propia experiencia práctica de los agricultores. Por ello, Bernal⁹⁵ describió al inventor típico del siglo XIX con las siguientes palabras:

El arquetipo del inventor era por lo general el de un simple aficionado a la ciencia que se las ingeniaba como mejor sabía para disponer de manera idónea una serie de ruedas, engranajes y palancas que pretendían imitar los movimientos del artesano imprimiéndoles mayor velocidad con la fuerza motora de la máquina de vapor.

La diferencia entre ser un aficionado a la ciencia y ejercerla de manera profesional es considerable, pero no puede dejar de notarse que existía ya un acercamiento a la ciencia para ayudarse a resolver los problemas técnicos. Este acercamiento fue gradual en algunos campos, y en cambio nació ligado a otros – la minoría de los casos – como la química y la electricidad. Las nuevas máquinas de vapor, con mayor potencia y velocidad de trabajo que aquellas accionadas por caballos, trajeron consigo requerimientos de mayor resistencia en los materiales empleados y mayor precisión de fabricación y manejo de los artefactos. Por ejemplo, estas máquinas requerían de tornillos con roscas definidas en dimensiones muy acotadas, plataformas de superficies rigurosamente planas, pistones y cilindros torneados con exigencias de precisión, ensambles perfectos entre las piezas, movimientos de gran regularidad, etc. Todo esto, a diferencia de épocas anteriores, requería ahora de una capacitación profesional que ya incluía conocimientos de geometría y resistencia de materiales. La necesidad de aplicar la ciencia a los nuevos retos de la técnica se aprecia en el comentario de Hall⁹⁶ sobre la técnica del siglo XIX:

El súbito incremento de las necesidades tecnológicas en particular, que desbordaban las posibilidades del carpintero o del herrero, la brusca constatación de que la capacitación técnica en todas las ramas era esencial para la mejora de los procedimientos industriales, los transportes, la agricultura y los instrumentos bélicos, llevaron a una situación en la que el saber y el método científicos no sólo podían, sino que debían aplicarse, en tanto que las grandes manufacturas proporcionaban los medios e incentivos necesarios para la aplicación de la ciencia.

No debe perderse de vista sin embargo, que las primeras máquinas de vapor, al igual que las primeras máquinas tejedoras, hiladoras, molinos y máquinas agrícolas en general, fueron inventadas y construidas sobre la base de la tradición técnica artesanal. Posteriormente, prácticamente todas las mejoras introducidas en las máquinas de vapor, fueron resueltas por técnicos prácticos primero, y sólo después se aplicarían a muchas de ellas las teorías científicas convenientes para mejorar sus parámetros de funcionalidad, a niveles que la pura práctica sería incapaz de producir.

Aunque la ciencia pura moderna se había desarrollado desde los siglos XVI y XVII, todo parece indicar que, el no haber contribuido a la solución de problemas técnicos no obedeció completamente a la falta de interés o comprensión por parte de los científicos de aquella época –ciertamente hubo resistencias ideológicas en muchos casos (ver caso de las universidades, sec. V.3)–, sino más bien a que la técnica no se había desarrollado lo suficiente por sí misma, como para requerir de trabajos basados en cálculos de precisión.

La madera fue el principal material de los instrumentos agrícolas hasta bien entrado el siglo XVIII, y las construcciones hechas a base de este material están muy lejos de la precisión que se alcanzó después con los metales; no es posible fabricar piezas de precisión con madera. Así, no tenía sentido efectuar cálculos de precisión como los que se pueden lograr en base a la ciencia, para una producción artesanal de instrumentos toscos, cuyo único requerimiento práctico era que simplemente funcionaran al nivel más elemental.

La agricultura de subsistencia, que como se ha dicho antes, fue el modo predominante hasta mediados del siglo XVIII, no requería de instrumentos que fueran más allá del nivel mínimo de funcionalidad. En cambio, la agricultura del siglo XIX, y en mucho mayor medida la del siglo XX, en las naciones que alcanzaron elevados niveles de industrialización, encaminada a elevar los niveles de producción y calidad para el mercado, requirió de instrumentos y máquinas cuya funcionalidad mínima ya no fue suficiente. Se requirió que los parámetros de funcionalidad se elevaran a tal grado, que la precisión de construcción y funcionamiento en base a la madera como material de construcción ya no fue suficiente, por lo cual los componentes metálicos se volvieron predominantes en las nuevas máquinas agrícolas a finales del siglo XIX. Sólo entonces los cálculos de precisión basados en las ciencias correspondieron a las necesidades y posibilidades técnicas. Es posible concluir entonces, que en lo que respecta al desarrollo técnico de la mayor parte del siglo XIX, y en particular de la mecanización agrícola, aquel periodo fue sobre todo de invención de una enorme variedad de máquinas e instrumentos agrícolas. Después, a finales del siglo XIX y principios del XX, sobre esta variedad de logros técnicos, los hombres de ciencia y los ingenieros con formación científica se encaminaron a mejorarlos, a elevar sus niveles de funcionalidad, introduciendo materiales y métodos basados tanto en la ciencia como en el saber técnico tradicional. La combinación del saber científico y técnico en los nuevos profesionales de la técnica, dió origen al ingeniero moderno. Este es capaz de diseñar máquinas con niveles de funcionalidad que al herrero y al carpintero artesanales, cuya principal fuente de innovación era el ensayo y error, les hubiera sido muy difícil de conseguir, tal vez imposible. Por ello, el valor de la

técnica en el siglo XIX fue la invención, mientras que en el siglo XX fue la elevación de los parámetros de funcionalidad a cargo de la ingeniería moderna.

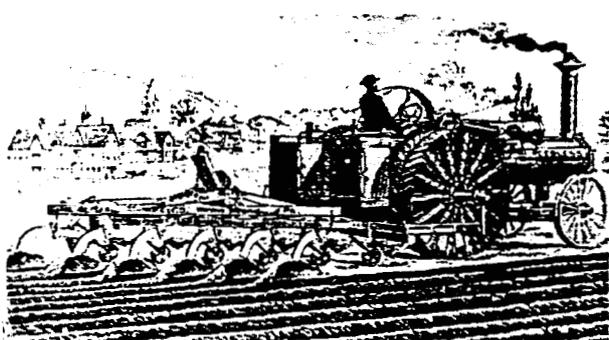
IV.2. Desarrollo del tractor agrícola

A finales del siglo XIX fue desarrollado el tractor agrícola, una máquina autopropulsada, primero por vapor y luego por otros combustibles derivados del petróleo, que en unas pocas décadas se convirtió en la máquina agrícola más importante, alrededor de la cual se diseñó la técnica de la mecanización de las labores agrícolas. Todos los instrumentos y máquinas agrícolas anteriores fueron adaptados al tractor, que sustituyó al caballo y a las máquinas estacionarias de vapor. Las máquinas e instrumentos del siglo XIX pasaron a ser “implementos del tractor”, o equipos accionados por el tractor. La incorporación de la serie de innovaciones técnicas que constituyeron el mejoramiento del tractor, se llevaron a cabo sobre una base de conocimientos que mezclaron la técnica tradicional y las teorías científicas, sobre todo de la mecánica, la electricidad, la termodinámica y la química, más bien a partir de los inicios del siglo XX. Gracias a esta mezcla de saber involucrado en el desarrollo técnico del tractor agrícola (desde el punto de vista interno), así como a otros factores, éste alcanzó alrededor de 1930 una configuración y diseño prácticamente igual a la del tractor actual. Desde inicios del siglo XX se comenzaron aplicar al diseño de tractores los métodos de la ingeniería moderna, de tal suerte que para finales de la década de 1910, ya se hace evidente la aplicación de principios científicos en una serie de cambios técnicos que hubiesen sido casi imposibles de alcanzar por la mera práctica de ensayo y error de la técnica tradicional.

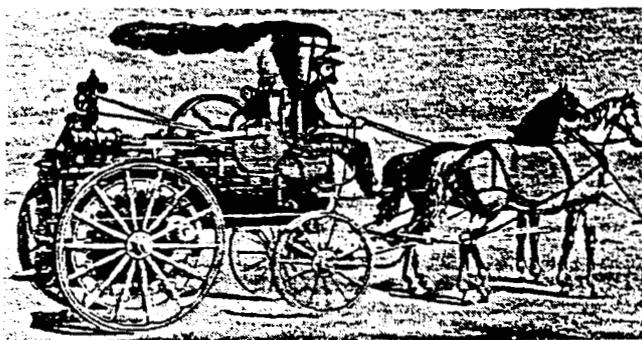
El tractor agrícola moderno es el resultado de conjuntar dos desarrollos técnicos del siglo XIX: la máquina de vapor transportable y el motor de gasolina. La máquina de vapor, originalmente estacionaria y para usos industriales y agrícolas, fue montada sobre un armazón o chasis con ruedas, pudiendo así ser transportada de un lugar de trabajo a otro, dando lugar a la máquina de vapor transportable por medios propios. Estas máquinas fueron adaptadas en los 1880's para labores agrícolas pesadas y lentas como el arar el terreno, llegando a ser conocidas como máquinas de vapor para tracción.

Las máquinas de vapor para tracción eran muy pesadas y de grandes dimensiones. Llegaron a construirse modelos que pesaban hasta 40 toneladas (un tractor de tamaño mediano actual, de una potencia de 80 hp, pesa alrededor de 3 toneladas). Además eran lentas y costosas, y muy difíciles de

operar. Por ejemplo, cuando eran transportadas de un lugar de trabajo a otro, las primeras de estas máquinas requerían de un grupo de caballos para cambiar de dirección, pues no se habían desarrollado aún mecanismos para este propósito, dado el enorme peso de estas máquinas. Sin embargo, los constructores de estas máquinas desarrollaron una serie de dispositivos que serían incorporados a los tractores de gasolina del siglo XX, tales como sistemas de engranajes, poleas para transmitir potencia, cadenas para transmitir el movimiento del motor a las ruedas y nuevos métodos y tecnologías de manufactura. La figura 12 muestra dos ejemplares de este tipo de antecesores de los tractores, (a) de 1886 y (b) de 1880.



(a)



(b)

Figura 12. Máquinas de vapor para tracción a) arando, b) en transporte. Fuente: Gray, R. B., *The agricultural tractor: 1855-1950*, pp. 4 y 5.

En cuanto al motor de gasolina, el primer modelo práctico fue ideado y construido por Niklaus Otto (1832-1900) en 1876, aunque había habido varios intentos anteriores. El motor de gasolina es un caso particular de los motores de combustión interna, a los cuales pertenece también el motor Diesel, ideado y construido por Rudolf Diesel (1858-1913) en 1897. Ambos tipos de motor fueron diseñados en buena medida (en mayor rigor el motor Diesel) aplicando los principios científicos de las máquinas térmicas, establecidos en 1824 por Sadi Carnot (1796-1832), uno de los primeros en aplicar principios físico-matemáticos para esclarecer los fundamentos de funcionamiento de las máquinas. Carnot había establecido un conjunto de ecuaciones matemáticas que relacionan la energía obtenida del calor al quemar combustible con el trabajo útil que se puede obtener de este proceso, obteniendo estos resultados al estudiar las máquinas de vapor de su tiempo, llegando a demostrar, entre otras cosas, que la máquina de movimiento perpetuo es imposible, porque violaría el segundo principio de la termodinámica que él mismo estableció en forma matemática. Basándose en los resultados de Carnot, Beau de Rochas estableció a su vez un conjunto de principios teóricos para construir un motor de este tipo. Fueron los resultados de De Rochas los que sirvieron de base a Otto para diseñar su motor de gasolina, que al inicio trabajaba con gas de hulla como combustible.

En 1889, John Chartier, en Estados Unidos, montó un motor de gasolina en el chasis de una máquina de vapor, construyendo así el primer tractor agrícola en ese país. Muchas compañías que antes fabricaban trilladoras o máquinas de vapor, comenzaron a construir este tipo de tractores entre finales del siglo XIX y principios del XX. Estos primeros tractores de gasolina, al igual que las máquinas de vapor para tracción de aquella época, eran pesados y lentos, puesto que aquellos motores de gasolina eran construidos en realidad para servir como fuente estacionaria de potencia para la industria, y no para otros usos especiales. Además, el chasis de las máquinas de vapor era también voluminoso y pesado. La figura 13 muestra un tractor de gasolina de estas características, de 1892..

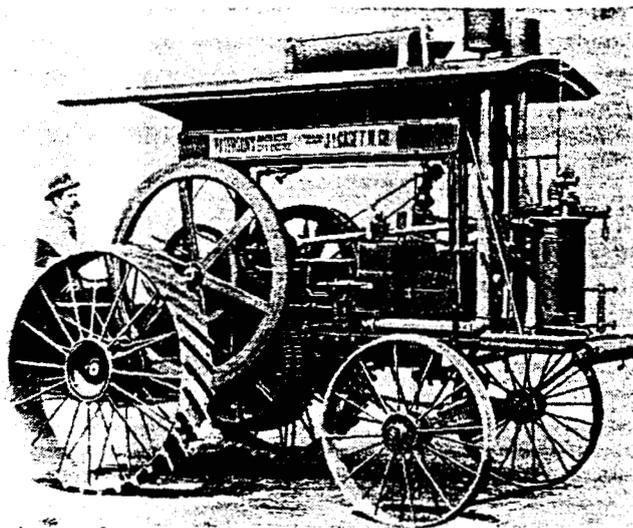


Figura 13. Uno de los primeros modelos del tractor de gasolina.. Fuente: Gray, R. B., The agricultural tractor: 1855-1950, pág. 16.

Aunque los tractores con este tipo de motores fueron introducidos a finales del siglo XIX, fue en la segunda década del siglo XX cuando se convirtieron en la vía principal de la mecanización agrícola, y de hecho en uno de los símbolos de la ingeniería agrícola. A menudo las compañías fundadas a finales de la década de 1890, tardaban diez o más años experimentando para sacar al mercado un modelos de tractor exitoso, esto es, con niveles de funcionamiento aceptables para el comprador. En la primera década del siglo XX se construyeron motores de gasolina especialmente adaptados por el tractor, ahora más pequeños y eficientes. Se modificó el chasis para adaptarlo especialmente para el tractor, se introdujeron engranajes cortados en acero en lugar de los de hierro colado, obteniendo así mayor resistencia y menor peso (la resistencia a la rotura de un acero común – estructural – es de unas 2.5 veces más elevada que la del hierro colado, aunque existen aceros especiales de mayores niveles de resistencia). Se introdujeron sistemas de enfriamiento del motor que permitieron a éste trabajar a mayores temperaturas, elevando así su eficiencia⁹⁷ y pudiendo quemar keroseno, un derivado líquido barato del petróleo. Se introdujeron carburadores desarrollados para la industria automotriz para estabilizar la ignición del combustible, la cual era muy irregular. No obstante, estos tractores eran muy

difíciles de manejar y muy incómodos, y apenas competían con las máquinas de vapor para tracción en las labores de ara, trillar y otras accionadas por un sistema de poleas y correas accionadas por el tractor. Fue hasta después de 1910 que los tractores de gasolina y keroseno comenzaron a desplazar a las máquinas de vapor.

De 1910 a 1912 apareció una gran cantidad de compañías para la construcción de tractores agrícolas, y siguió aumentando a tal grado que en 1920 había en Estados Unidos alrededor de 200. La década de 1910 a 1920 registró la disminución del tamaño del tractor promedio. Se abandonaron los grandes y pesados tractores y se construyeron tractores pequeños y livianos, adecuados ya no solo para labores pesadas, sino para muchas labores más ligeras. Casi todas las labores agrícolas se mecanizaron en aquella época en torno al tractor. Fue un periodo de cambios tan rápidos que según Wendel,⁹⁸ muchos diseños e innovaciones quedaban obsoletos antes de abandonar las mesas de dibujo de los diseñadores. Se construyeron motores más revolucionados, de 1800 revoluciones por minuto (rpm) contra las 400 rpm anteriores, lo cual permitió reducirlos de tamaño y aumentar su potencia. En 1915, la Moline Plow Company diseñó el primer tractor de uso universal, para cualquier labor agrícola, con los implementos accesorios respectivos. Esta concepción del tractor se mantiene hasta hoy. Se incorporó la puesta en marcha encendido eléctrica y las luces eléctricas. Se introdujo la toma de fuerza para accionar otras máquinas agrícolas a partir de una flecha giratoria, tales como empacadoras, cortadoras de forraje, cosechadoras, etc. En 1917, Ford Motor Company colocó en el mercado el modelo de tractor pequeño Fordson. De los 133 000 tractores que se vendieron en 1918, 34 000 eran de esta marca.⁹⁹

Sin embargo, muchos modelos eran defectuosos, e incluso de abandonaban en el mismo campo de trabajo. Por esta razón, en 1919 se emitió una ley en el congreso del estado de Nebraska, la cual creó un centro nacional de pruebas para tractores. Todos los modelos de tractores estarían desde entonces sujetos a una serie de pruebas sobre su calidad de construcción, funcionalidad, facilidad de mantenimiento y otras como condición obligada para poder salir al mercado. Un tractor cuya evaluación resultara insatisfactoria no podría salir al mercado. Estas pruebas se tomaron como modelo en casi todos los países del mundo con un desarrollo notable en la mecanización agrícola (que en general coinciden con los países altamente industrializados), y significaron el inicio de la estandarización de los parámetros de funcionalidad de las máquinas agrícolas. Estas pruebas se diseñaron con métodos basados en las ciencias involucradas en los parámetros evaluados, lo que denota ya el papel importante de la ciencia en los asuntos técnicos de la agricultura, tal como ya estaba sucediendo en prácticamente todas las ramas de la producción.

En la década de 1920 se mejoraron los motores, que se hicieron aún más pequeños y potentes; se popularizó la gasolina, desplazando al keroseno como combustible; se mejoró la transmisión al diseñar tractores de tres o cuatro velocidades de avance (antes eran sólo de una, y rara vez de dos velocidades); se introdujeron sistemas para reducir la fricción como los cojinetes y las cajas de engranajes sumergidos en aceite; se equipó a los tractores con sistemas de enfriamiento del motor a través de circulación de agua impulsada por una bomba, ventiladores, sistemas de lubricación y limpiadores del aire que entraba a las cámaras de combustión, filtros de aceite y muchas mejoras más. Para la década de 1930 se desarrollaron los neumáticos inflables, con lo cual se aumentó la potencia disponible, se gastó menos combustible y el manejo del tractor se volvió más cómodo. En aquella década se comenzó a estandarizar toda la conformación y partes del tractor, así como los parámetros de calidad. Se comenzaron a utilizar los motores diesel.

El tractor de los 30's tiene ya prácticamente la configuración de los tractores actuales, a excepción de los componentes hidráulicos y electrónicos. La figura 14 muestra la configuración de un tractor de 1936, de tamaño pequeño.

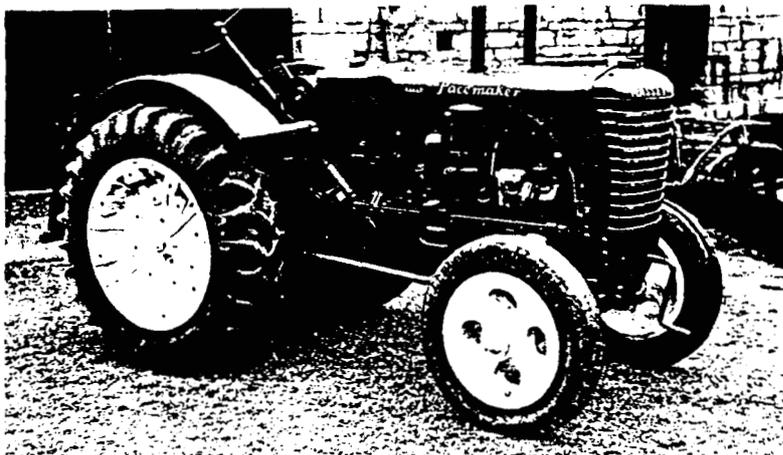


Figura 14. Tractor pequeño, de la década de 1930. Fuente: Williams, Michael., Massey-Ferguson tractors, pág. 37.

Todas estas innovaciones técnicas incorporadas al tractor, han elevado los niveles de los niveles de funcionalidad de las máquinas agrícolas modernas, la mayoría de las cuales se configuraron a partir de la década de 1910-1920, y continúan refinándose hoy. Si bien a finales del siglo XIX algunos componentes de las máquinas agrícolas modernas, como el motor y algunos mecanismos, se diseñaban ya en base a una aplicación de la ciencia, conjuntamente con la técnica tradicional, todo parece indicar que fue en la segunda década del siglo XX cuando los métodos y el conocimiento de la ingeniería moderna se generalizaron para el diseño de las máquinas agrícolas, a manos de ingenieros modernos egresados ahora de la universidades, siendo el tractor el centro principal de la nueva técnica. En la

década de 1930 ya es indudable el papel de la ingeniería moderna en el diseño de máquinas de todo tipo, incluyendo desde luego al sector agrícola.

La expresión más acabada y notable del uso de la ciencia para apoyar la solución de problemas técnicos en la ingeniería moderna, es el diseño de maquinaria y equipo agrícola para labores complejas donde, además diseñar las máquinas, se diseña todo su entorno de funcionamiento. Se diseña genéticamente la planta (altura, maduración, consistencia, etc.), los métodos de riego, el tipo de suelo y otros factores para que la funcionalidad de la técnica empleada sea lo más elevado posible. Así, se aplican también ciencias biológicas como la genética, la botánica y la fisiología vegetal. Como ejemplo se puede citar la cosechadora de jitomate descrita por Rasmusen.¹⁰⁰ Este autor ha dicho sobre esto que:

La cosechadora mecánica de tomates [jitomate], cuyo éxito dependió de los esfuerzos combinados de ingenieros, botánicos y agrónomos, puede ser considerada como típica de los recientes avances dentro de la estructura tradicional agrícola.

Además de diseñar la máquina, se generó una variedad de jitomate en la que maduran casi al mismo tiempo todas las plantas de la parcela, y la cáscara del fruto es más resistente al daño mecánico, lo cual reduce los daños al cosecharlo a máquina. Situaciones semejantes se pueden notar en el diseño del equipo agrícola y su entorno para labores como la cosecha de trigo, algodón, soya y otros cultivos. Y ciertamente, como lo expuso Rasmussen, ésta es una tendencia en el diseño de maquinaria agrícola, cuando los recursos económicos lo permiten.

IV.3. El paquete tecnológico de la agricultura científica

La mecanización agrícola fue parte de un conjunto de prácticas agrícolas que, en conjunto, cambiaron el modo de producir alimentos y elevaron los estándares de producción, tanto en cantidad (esto fue lo primero) como en calidad en el periodo mencionado. A este conjunto de prácticas agrícolas, todas las cuales fueron influidas por la aplicación de la ciencia a finales del siglo XIX, y que fueron en gran medida (como la mecanización) un mejoramiento de las prácticas tradicionales, se le denomina paquete tecnológico.

Este paquete tecnológico incluye campos de acción como la propia mecanización, el manejo de plagas y enfermedades, la aplicación de abonos y fertilizantes, y el mejoramiento genético de variedades de plantas y animales. En todos estos campos sucedió prácticamente lo mismo: se introdujo la ciencia para

transformar la agricultura tradicional, ineficiente y típicamente de subsistencia, en una agricultura intensiva en cuanto a producción.

Por ejemplo, en lo que se refiere al enriquecimiento del suelo mediante la adición de abonos, se sabía desde la antigüedad que, si un suelo se sembraba varios años consecutivos con el mismo cultivo, entonces se empobrecía, bajaban los rendimientos. Se sabía también que agregando al suelo el estiércol animal y dejando “descansar” un año al terreno, es decir, dejando crecer libremente la vegetación y luego incorporándola al suelo, éste mejoraba su capacidad de producción normal. Esto se aprendió por la práctica por quizás miles de años, y se practicaba justo antes de la revolución industrial, en el siglo XVIII, y en parte en el siglo XIX. En el siglo XIX se agregaban al suelo algunos subproductos orgánicos de la industria, tales como residuos industriales orgánicos procedentes del hervido del jabón, de la sastrería y de las raspaduras de cuerno para la fabricación de mangos de cuchillos. También se esparcían en el terreno heces animales luego de ser trituradas o disueltas mediante ácido sulfúrico. Incluso se llegó a utilizar huesos humanos en Inglaterra en la década de 1880, procedentes de algunos campos de batalla. También se aplicaba excremento de pájaro marino (guano peruano) desde 1602, en Portugal.

De la industria química se desarrollaron los fertilizantes, es decir, los abonos artificiales, producidos en laboratorios, sobre la base de un fundamento teórico y con amplios niveles de experimentación. Uno de los más importantes fertilizantes agrícolas, esencial para el crecimiento de las plantas, es el superfosfato, del cual aquellas extraen el fósforo. El superfosfato fue producido por primera vez en 1817, en Dublín. En 1848, J. B. Lawes estableció en Inglaterra una fábrica de superfosfatos, la cual, en la década de 1870 fabricaba unas 40 000 toneladas anuales de este producto. Por esa misma época se fabricaban fertilizantes que proporcionaban otros dos nutrientes esenciales para los cultivos agrícolas: nitrógeno y potasio. No se debe perder de vista que la industria química, como lo señalara Bernal, fue uno de los campos productivos que nacieron estrechamente ligados a la ciencia, es decir, que no se hubieran desarrollado como lo hicieron sin la asistencia de los conocimientos y procedimientos de la ciencia.

La obtención de variedades animales y vegetales de alto rendimiento, resistentes a ciertas condiciones climáticas y a ciertas plagas y enfermedades, se aceleró a principios del siglo XX con la aplicación de las leyes básicas de la herencia genética, formuladas en 1865 por Gregor Mendel (1822-1884). Por

ejemplo, se obtuvieron variedades de trigo híbrido en Estados Unidos y Canadá. En Estados Unidos, estas variedades de trigo permitieron pasar de 23 hectolitros por hectárea en 1900 a 36 en 1950.

De la aplicación de la química a la agricultura también se destacan el desarrollo de sustancias para el control de malezas, plagas y enfermedades en los cultivos. Desde 1900 se aplicaron sales de cobre y arsénico y de azufre para el control de enfermedades vegetales producidas por hongos. Para el control de insectos se utilizaron extractos de plantas como la nicotina y el pelitre, mientras que para eliminar las malezas o plantas competidoras de los cultivos, se aplicaron compuestos como el clorato sódico y el ácido sulfúrico, aunque éstos no eran selectivos, es decir, eliminaban por igual a las malezas que al cultivo, por lo cual su aplicación era muy laboriosa.

En la década de 1930 se desarrollaron algunos químicos selectivos para el control de malezas, como el dinitroortocresol (DNOC), patentado en Francia, y el ácido 2,4 diclorofenoxiacético (2,4-D) en Estados Unidos. Para el control de insectos se desarrolló, en 1939, el diclorodifenilcloroetano (DDT). El desarrollo de este tipo de sustancias se basó en aplicaciones de ciencias como la química y la fisiología animal y vegetal. Aunque muchos de estos productos químicos tuvieron que ser retirados o controlados debido a efectos adversos en la salud humana y al medio ambiente. El DDT es un caso ejemplar de esta situación.

La tecnología agrícola en la actualidad, conformada por el paquete tecnológico antes bosquejado, es resultado de la aplicación de los métodos de la ingeniería, producto de la suma del conocimiento técnico tradicional y de las ciencias aplicadas de la ingeniería, así como de un conjunto de ciencias biológicas. Fue así como la ingeniería moderna se fue configurando a finales del siglo XIX y principios del XX. No se aplicó antes la ciencia a los problemas técnicos por diversas razones. Ya se mencionó la precisión alcanzada por la técnica como condición indispensable para que las soluciones teóricas tuvieran sentido. Otras razones importantes tienen relación con la educación y la producción masiva para el mercado.

IV.4. La enseñanza universitaria de la ingeniería

Muchos problemas asociados a cuestiones prácticas habían sido ya abordados desde la ciencia en los siglos XVII y XVIII, antes de que el complejo técnico de la revolución industrial fuera construido.

Aunque los métodos y principios de la ciencia se aplicaron en aquella época a algunos problemas prácticos, estas soluciones permanecieron en muchos casos en los libros durante siglos antes de aplicarse a los problemas involucrados en la técnica. Científicos como Galileo, Euler, Lagrange, D'Alembert y muchos más, aplicaron teorías científicas y dieron fundamentación teórica a problemas prácticos, pero sus aplicación efectiva a la realidad tardó mucho tiempo. Por ejemplo, Daumas¹⁰¹ ha expuesto que:

Hasta comienzos del siglo XIX, los constructores y expertos no pudieron leer la literatura técnica, porque una gran parte de ellos no sabía leer o no podía trasladar las sugerencias de los perfeccionamientos a equipos capaces de funcionar. Lo demuestran dos buenos ejemplos: el problema del perfil de los dientes de las ruedas de engranaje y la fabricación de hierro en lingotes. El primero estaba teóricamente resuelto hacia fines del siglo XVII, pero los expertos en mecánica siguieron ateniéndose a su método empírico hasta mediados del siglo XIX. En el segundo caso, las numerosas investigaciones y los abundantes tratados del siglo XVII no le fueron de ninguna utilidad a los maestros herreros.

Los cuadernos de Leonardo Da Vinci, en donde había plasmado los resultados de sus investigaciones y el desarrollo de diversos artefactos, no fueron publicados hasta 1881.

Por otra parte, fue hasta finales del siglo XIX que aparecieron en Estados Unidos, centro de la mecanización agrícola moderna, los primeros ingenieros profesionales modernos, preparados ahora en las universidades, con conocimientos científicos, para resolver los problemas técnicos de manera científica. Antes de esto, en las universidades estadounidenses no se estudiaban las entonces llamadas artes útiles, es decir, los oficios prácticos, tales como la herrería y la carpintería.

En Europa ya había algunos antecedentes desde finales del siglo XVIII, como la fundación de *la Ecole Polytechnique* en Francia y la creación de la *Royal Institution* en Inglaterra, países en donde se comenzó a trabajar científicamente sobre los problemas técnicos, sobre todo en Francia, aunque orientada en gran medida en esta última a aplicaciones militares. La Ecole Polytechnique de París fue creada con el abierto propósito de que los hombres de ciencia entrenaran a los futuros ingenieros en los conocimientos matemáticos, físicos y químicos necesarios para el diseño de las obras de ingeniería. El matemático, físico y astrónomo Laplace (1749-1827) es un ejemplo de los científicos que enseñaron en aquella escuela, de donde egresó Sadi Carnot. Sin embargo, esta institución era ya inadecuada para las necesidades de la nueva era industrial.¹⁰² En Inglaterra, aún siendo el centro de la revolución industrial, hasta 1875 se creó, en la Universidad de Cambridge, la primera cátedra de mecanismos aplicados y mecánica aplicada. En la Universidad de Oxford, la más antigua de ese país, no hubo cátedra de ingeniería hasta 1907. En Alemania, las universidades antiguas existentes en el siglo XIX (al igual que en Estados Unidos e Inglaterra) no aceptaron la inclusión de un enseñanza tecnológica en sus planes de

estudio. Pero ya había conciencia de la necesidad de formación universitaria de los ingenieros para las nuevas necesidades de la industria, por ello se crearon instituciones autónomas para la enseñanza superior de la tecnología, las *Technische Hochschulen*, que eran verdaderas universidades. La primera de éstas fue la *Universität Fridericiana* en Karlsruhe, fundada en 1825, aunque la mayoría de ellas se fundaron hasta después de la segunda mitad del siglo XIX. Por ejemplo, la Universidad Técnica de Munich se fundó en 1868, y la de Berlín en 1879.

Por lo que a Estados Unidos se refiere, sólo hasta finales del siglo XIX se introdujo la técnica en las universidades. David Noble¹⁰³ ha expuesto esta situación de la siguiente manera:

El pequeño mundo en que se unieron por primera vez la ciencia y las artes útiles...fue limitado durante la mayor parte del siglo XIX. Los científicos que trabajaban en las universidades seguían en su mayoría lo que llamaban filosofía natural y aspiraban en sus investigaciones a descubrir las verdades metafísicas más elevadas sobre la naturaleza del universo y el papel de los mortales dentro de él; en general, no tenían más que menosprecio para la aplicación práctica de su trabajo y su concepto correlativo, ganar dinero. Los hombres prácticos que poblaban el taller y la oficina, en cambio, mostraban poco interés por la teoría y la especulación; en su búsqueda exclusiva de la utilidad y el beneficio, se basaban únicamente en la sabiduría tradicional y en las lecciones de la experiencia, duramente aprendidas.

... La industria moderna basada en la ciencia...no surgió hasta finales del siglo XIX.

Así, en Estados Unidos, la educación técnica superior surgió en pugna con las universidades establecidas, en las cuales había un menosprecio por el estudio de la ciencia experimental, y aún más por las artes útiles, pues se consideraba que éstas nada tenían que ver con el espíritu académico universitario. Por ello instituciones como el *Masachussetts Institute of Technology*, fundado en 1861 y el *Stevens Institute of technology*, fundado en 1870, fueron establecidas aparte de las universidades ya establecidas, con el propósito específico de enseñar tanto ciencia con artes útiles, así como de aplicar la ciencia a las necesidades de la industria en pleno auge. La educación técnica superior con una base científica recibió su mayor impulso inicial en aquella época en 1862, cuando el congreso estadounidense aprobó la Ley Morrill. A través de esta ley el gobierno federal aportaría ayuda económica a los estados para estimular a las universidades especializadas en la agricultura y las artes mecánicas, ambas áreas básicas para el nacimiento de la ingeniería agrícola, y decisivas para fomentar el desarrollo tecnológico de la mecanización agrícola. Como resultado de esto Noble explica que: “A partir de 1870 aproximadamente, los planes de estudio de ingeniería adquirieron claramente un carácter más científico y el centro de atención del estudio de la ciencia se trasladó de las leyes de la naturaleza a los principios del diseño.”¹⁰⁴

La enseñanza universitaria de la ingeniería moderna comenzó así a configurarse, puesto que en ésta, el diseño es la base para abordar los problemas técnicos (ver cap. VI). La ciencia adquirió un papel

central en la técnica, en buena medida también porque los problemas técnicos se volvían más complejos, y el método tradicional de ensayo y error, basado en el puro conocimiento técnico tradicional, comenzó a ser insuficiente. Al principio, las nuevas escuelas técnicas ponían un mayor énfasis en lo práctico, enfatizando una gran cantidad de trabajo en el taller y el trabajo mecánico. Pero a partir de 1870 se observó una lenta pero decidida tendencia hacia la utilización de laboratorios en la investigación y experimentación científica para resolver los problemas técnicos. Y se construyeron cada vez más laboratorios para las carreras de ingeniería. Noble¹⁰⁵ agrega que:

En la ingeniería mecánica, bajo la influencia de ingenieros preocupados por la ciencia...la enseñanza fue basándose cada vez más en los principios científicos de la hidráulica, la termodinámica y la fuerza [resistencia] de los materiales, temas que a menudo se clasificaban como ramas de la física.

La ingeniería mecánica es la más importante rama de la ingeniería para el desarrollo de las máquinas agrícolas. Aunque desde fines del siglo XIX ya se estaba configurando la ingeniería moderna, los “ingenieros científicos” egresados de las escuelas técnicas superiores, tardaron en ser aceptados en la industria, donde los hombres prácticos tenían los puestos directivos. Fue por ello que hasta el siglo XX, como ya se mencionó antes, la ingeniería moderna se aplicó a todas las áreas del desarrollo de las máquinas agrícolas. Alrededor de 1960, J. B. Davidson,¹⁰⁶ profesor de ingeniería agrícola del *Iowa Agricultural College* escribió un artículo en el que anunciaba que en aquella institución se comenzaría a impartir mecánica agrícola a nivel profesional, dada la demanda. Decía el profesor Davidson que:

...we must conclude that modern machinery is from necessity quiet complex and complicated, and that is an important factor in modern farming operations.

...To operate and care for the machinery of the farms, to secure for himself the greatest returns in the way of salable products and comforts, the successful farmer of today must be trained along mechanical and engineering lines. To supply this training is the function of the department of agricultural engineering at the Iowa Agricultural College. This branch of agricultural instruction is perhaps the newest of all branches...It has been but a few years since the first department of this kind was organized in an agricultural college.

...the demand for men as instructors who are trained along these lines requires that the department offer special work to meet this demand. There is no other place where so desirable conditions are to be had for special study along these lines. Furthermore, it is hoped that the department will also be able to furnish men who will be useful in the various phases of the farm machinery industry..

(Trad. ...debemos concluir que la moderna maquinaria [agrícola] es por necesidad compleja y complicada, y que es un factor importante en las modernas operaciones agrícolas.

...Para operar y cuidar la maquinaria de las granjas agrícolas, para asegurarse un máximo aprovechamiento de la misma con miras a obtener productos vendibles y comodidades, el granjero exitoso de hoy debe ser entrenado en cuestiones mecánicas y de ingeniería. Dar este entrenamiento es la función del departamento de ingeniería agrícola del Iowa Agricultural College. Esta rama de la instrucción agrícola es tal vez la más novedosa de todas las ramas de este campo. Ha sido hasta hace unos pocos años que el primer departamento [carrera] de este tipo ha sido organizado en una escuela agrícola.

...la demanda de hombres como instructores que estén preparados en estas áreas requiere que nuestro departamento satisfaga estas necesidades. No hay ningún otro lugar donde se tengan las condiciones especiales que aquí se tienen para cumplir los objetivos de estudio especial de este campo. Aún más, se espera que este departamento sea también capaz de preparar hombres que sean útiles en las varias etapas que conforman la industria de la maquinaria agrícola.)

Este testimonio da una idea de la novedad de la profesión de la ingeniería agrícola (agricultural engineering) enfocada a la maquinaria agrícola en aquellos días, resaltando además la necesidad de abordar de esta manera la construcción y operación del equipo agrícola, dada la complejidad que ya había alcanzado. Esto se manifestó por ejemplo en que, la mayoría de los mecanismos empleados en los tractores con motores de combustión interna, habían sido desarrollados en realidad para las máquinas de vapor para tracción. Ahora, estos mecanismos y sus piezas tuvieron que construirse con mayor resistencia y mayor precisión para los nuevos tractores, para adaptarse a motores más potentes y de mayor velocidad.¹⁰⁷ Para efectuar estas mejoras, los métodos tradicionales de ensayo y error ya no fueron suficientes, por lo cual los métodos de la ingeniería moderna se volvieron indispensables. Para fabricar piezas de menor tamaño, mayor resistencia y mayor precisión, es inevitable recurrir a ciencias de la ingeniería como la resistencia de materiales, teoría de máquinas y mecanismos y teoría de elementos de máquinas, entre otras; es casi imposible lograr esto por puro ensayo y error. Además, la producción masiva de maquinaria agrícola requirió de la fabricación de muchas piezas del mismo tamaño y forma con gran precisión para ser intercambiables como refacciones. Y las pruebas de tractores fueron diseñadas primero en la *Ohio State University* en 1919, y luego fueron implementadas en Nebraska por la *University of Nebraska* (ver pág. 61), participando en ambos casos profesionales con una formación en la ingeniería moderna.

De esta manera, en las primeras dos décadas del siglo XX se consolidó el diseño y pruebas de la tecnología involucrada en la mecanización agrícola a cargo de la ingeniería moderna. La ciencia ha estado desde entonces involucrada en la solución de los problemas técnicos a través de las ciencias de la ingeniería y en conjunción con el saber técnico tradicional acumulado. Tan sólo unos dos siglos antes, la ciencia estaba casi por completo ajena a los problemas prácticos. Para 1913 había 40 000 estudiantes de ciencias y tecnología (ingeniería) en Estados Unidos, 17 000 en Alemania y 6 500 en Gran Bretaña.¹⁰⁸ La influencia de la aplicación de la ciencia en la técnica elevó los estándares de funcionalidad de los artefactos y los medios técnicos a niveles casi imposibles de alcanzar por el puro saber técnico tradicional, basado en el ensayo y error para la innovación. Este dramático cambio en la técnica, bajo la influencia directa de la aplicación de los principios y métodos de la ciencia, se advierte en el cambio cuantitativo de algunos parámetros relativos a la producción y tecnología agrícolas, tal como se aprecia en la siguiente sección.

IV.5. Los parámetros de funcionalidad de la tecnología agrícola moderna

Existen algunos indicadores de la influencia de la mecanización moderna en la producción agrícola desde el siglo XVIII hasta el XX. Uno que es de suma importancia y en el que más ha influido la tecnología moderna es el que tiene que ver con la capacidad de trabajo de las nuevas máquinas. Por ejemplo, para la producción de trigo en Estados Unidos, en 1776 se requería un total de 56 horas-hombre por acre,¹⁰⁹ de los cuales 37 eran para la cosecha; todas las labores eran entonces completamente manuales. Antes de esta época, se utilizaba la hoz para la siega manual. Se han hecho mediciones en el campo para evaluar el tiempo requerido para segar un acre de cultivo con los distintos tipos de hoces que se han desarrollado desde los tiempos más antiguos. Con el instrumento más antiguo conocido de este tipo, un cuchillo recto “primitivo”, se requieren más de 300 horas, mientras que con una rudimentaria hoz de arcilla (ver figura 5, sec. II.2) del 2 600 a.C. se necesitan 120 horas. Con la hoz de bronce, del 1 200 a.C. se requieren 104 horas y con una hoz moderna, utilizada desde el siglo XIX hasta hoy en los países con una agricultura tradicional, donde la cosecha es aún manual, el tiempo es de 40 horas.¹¹⁰ Para 1876 el total de horas-hombre para la producción de trigo había bajado a 15, y sólo 3 horas para la cosecha, ahora mecanizada, utilizando cosechadoras tiradas por caballos. En 1976, con máquinas agrícolas diseñadas en base a la ingeniería moderna, todas las labores de este cultivo estaban mecanizadas, requiriendo un total de 0.9 horas-hombre por acre, de las cuales sólo 0.16 horas eran para la cosecha.¹¹¹

Se han hecho estimaciones del número de personas que se han requerido en diversas épocas en Francia para que una hectárea de trigo sea segada y engavillada (atada en manojos) en una hora. Según este estudio, en 1750, utilizando la hoz, se requerían 50 personas; en 1830, utilizando la guadaña (un instrumento manual de corte con mayor longitud que la hoz), se necesitaban 30 hombres. En 1870, empleando una segadora tirada por caballos, se requerían 10 hombres. Para 1950 con una cosechadora trilladora moderna autopropulsada, se requería sólo de un hombre.¹¹²

Se han hecho otras comparaciones relativas al aumento de la capacidad de trabajo agrícola debido a la mecanización de las labores. Por ejemplo, el cuadro 1 muestra algunos índices de producción, superficie cultivable, producción por hectárea y producción por trabajador en Estados Unidos y Japón en dos etapas: 1880 y 1960, tomando el valor de cada parámetro igual a 100 en 1880 y evaluando su nuevo valor en 1960 con respecto al primero.

Cuadro 1. Diversos índices de desempeño agrícola entre 1880 y 1960. Fuente: Johnston, B. F. y Kilby, P. (1975) *Agricultura y transformación estructural*, pág. 222.

	1880	1960
PRODUCCIÓN (excepto semillas y forrajes)		
Estados Unidos	100	340
Japón	100	358
SUPERFICIE CULTIVABLE		
Estados Unidos	100	143
Japón	100	280
PRODUCCION POR TRABAJADOR MASCULINO		
Estados Unidos	100	680
Japón	100	453

Al interpretar los datos de este cuadro, debe tenerse en cuenta que, en 1880, la mayoría de las máquinas agrícolas eran tiradas por caballos y unas cuantas eran accionadas por máquinas de vapor, construidas sobre todo en base al saber técnico tradicional. En cambio, en 1960, el equipo agrícola está diseñado sobre la base de los principios y métodos de la ingeniería moderna, por lo cual estos datos resultan muy ilustrativos del efecto de la aplicación de las ciencias de la ingeniería en las labores agrícolas. Además, la producción por hectárea y por trabajador aumentaron mucho más que la superficie cultivable, por lo cual el aumento de la producción agrícola en este lapso es mucho más debido al aumento de la eficiencia del trabajo mecanizado (y de todo el paquete tecnológico agrícola, basado también en la aplicación de la ciencia) que a la apertura de nuevas tierras de cultivo. La capacidad de trabajar mayor cantidad de terreno por trabajador aumentó también, de tal suerte que en 1880 un trabajador agrícola de Estados Unidos podía trabajar 10 hectáreas; este índice aumentó en 1960 a 46 hectáreas.¹¹³

En 1854 un trabajador agrícola, con los toscos aperos de labranza de aquella época, producía lo suficiente para sí mismo y cuatro o cinco personas más, mientras que para 1920 el número había aumentado a nueve personas. Para 1955, con equipo agrícola moderno, un trabajador agrícola producía para sí mismo y 18 personas más,¹¹⁴ y actualmente se estima que esa cifra llega hasta 30 en países como Estados Unidos.

El hecho de que menos gente pudiera hacer el mismo trabajo agrícola que antes, y además con mayor calidad, debido al uso de la maquinaria agrícola, se aprecia por el decrecimiento de la mano de obra agrícola en relación al crecimiento de la mano de obra total. Las gráficas (a) y (b) de la figura 15 muestran estas tendencias para Estados Unidos y Japón.

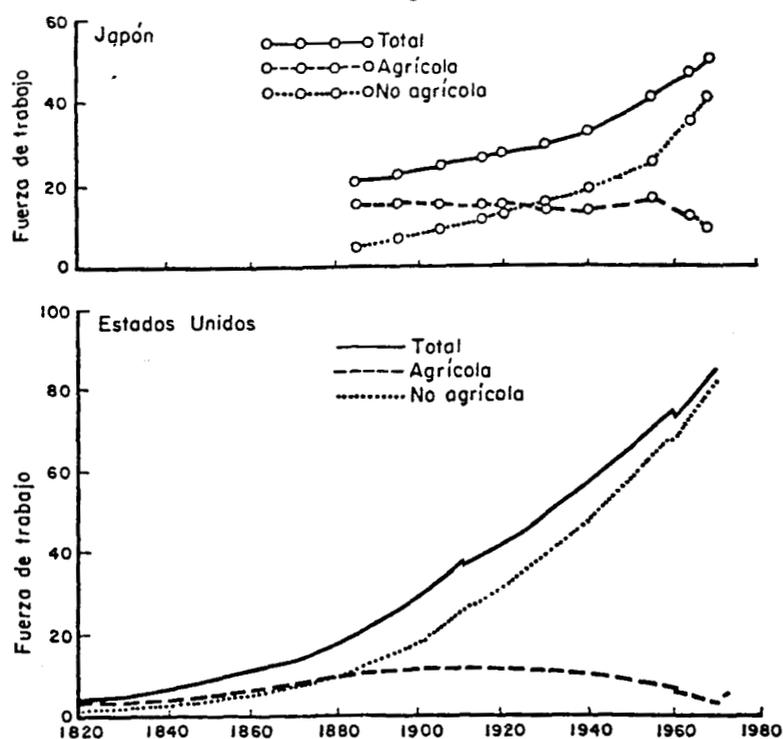


Figura 15. Fuerza de trabajo total, agrícola y no agrícola, En Estados Unidos a partir de 1820, y en Japón a partir de 1885. Fuente: Johnston, Bruce F. Y y Kilby, P., Agricultura y transformación estructural, pág.224.

La mecanización agrícola, junto con el resto del paquete tecnológico, contribuyó a aumentar la productividad agrícola en todo el siglo XX, medida ya sea en toneladas por hectárea, o en toneladas de producto por hora de trabajo, como lo muestra la gráfica de la figura 16.

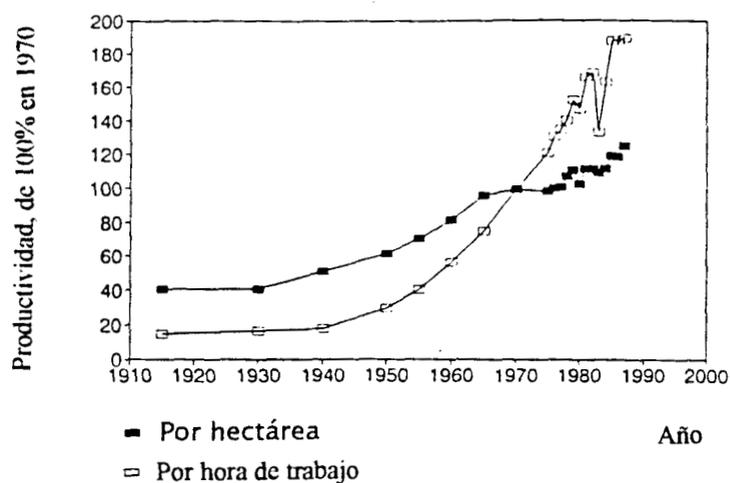


Figura 16. Productividad agrícola en Estados Unidos, por hectárea y por horas de trabajo desde 1915. Fuente: Goering, Carroll E., Engine and tractor power, pág. 2. (Base: 1970 = 100)

Un caso concreto de comparación de índices de productividad entre tres grados de mecanización que se dan en México en la actualidad, permite estimar el efecto de la tracción animal y del tractor en las labores agrícolas. Se trata de las labores correspondientes al cultivo de maíz bajo ciertas condiciones,¹¹⁵ en donde se encontró que si el trabajo se lleva a cabo mediante una combinación de labores manuales y de tracción animal, se requiere un promedio de 75 horas de trabajo por hectárea, mientras que si las labores se efectúan con tracción animal se requieren 50 horas por hectárea. Si las labores se realizan utilizando únicamente tractores con sus respectivos implementos, sólo se requieren 10 horas de trabajo por hectárea para sacar adelante el cultivo. Esto permite darse una idea de la productividad que tenía la agricultura con una técnica tradicional anterior al siglo XVIII, aunque obviamente las condiciones en la antigüedad eran mucho más difíciles, por lo cual es de esperar que la productividad fuese aún menor.

Como un ejemplo más, considérese el hecho de que, en 1793, antes de la invención de una máquina para descascarillar el algodón, por Whitney en Estados Unidos (un maestro de escuelas elemental), la producción manual de descarrilado era de una libra de algodón por jornada de trabajo.¹¹⁶ La cosecha manual de algodón aún hoy en día, alcanza el 75 % del gasto total del cultivo. En contraste, la moderna cosechadora de algodón (una de las máquinas agrícolas más complejas en la actualidad) realiza el trabajo de unos 60 obreros y trabaja a razón de 0.5 a 0.7 hectáreas por hora.

La reducción del tiempo de trabajo en las labores agrícolas, el aumento de la productividad agrícola y demás alcances debidos a la mecanización agrícola, son producto del mejoramiento de una gran cantidad de parámetros asociados a la funcionalidad de las máquinas agrícolas, particularmente en el siglo XX. Algunos de estos parámetros son el peso de a máquina, la velocidad de trabajo, la potencia desarrollada, y la eficiencia y calidad del trabajo. Existen muchos parámetros más, y son el centro de atención del diseño en la ingeniería agrícola moderna. Para darse una idea de cómo se ha trabajado en la mejora de estos parámetros, es conveniente presentar algunas comparaciones entre el estado de estos parámetros en la época de la técnica tradicional y de la tecnología moderna.

Un parámetro muy significativo es la potencia desarrollada por una máquina, pues es un indicador claro de la capacidad de llevar a cabo un trabajo útil en un tiempo dado. En la antigüedad y hasta bien entrado el siglo XVIII, buena parte de las labores agrícolas era llevada a cabo en forma manual o con tracción animal. En condiciones normales, un hombre promedio desarrolla una potencia de 0.07 a 0.1 kilowatt (de 0.0989 a 0.134 HP),¹¹⁷ es decir, alrededor de la décima parte de la potencia de un caballo.

Desde los tiempos de los antiguos egipcios hasta el siglo XVIII se usaron algunos implementos agrícolas accionados por uno o dos caballos, es decir, se dispuso de potencias de uno o dos HP. En el siglo XIX se llegaron a emplear trilladoras de cereales tiradas hasta por 32 caballos, aunque su manejo era muy incómodo en el campo de trabajo. En realidad, por lo regular eran tiradas o accionadas por grupos de 2 a 6 caballos. Con la llegada de la máquina de vapor, la potencia disponible para el trabajo agrícola aumentó. En 1835, el promedio de las máquinas de vapor en Inglaterra era de una potencia de 15 HP. Hoy en día se construyen tractores con potencias desde 20 hasta 400 HP, según el tipo de labores y extensiones de terreno a que sean destinados, siendo más comunes entre 80 y 150 HP, todos en base a motores diesel de combustión interna. Hasta antes de la máquina de vapor hubo sin embargo dos tipos de máquinas, muy comunes desde la Edad Media: el molino de viento y la rueda hidráulica, ambas mayormente de uso agrícola, cuya potencia, salvo muy raras excepciones no sobrepasaba los 10 HP. Hoy un tractor agrícola de 100 HP concentra la misma potencia que algo más de 1 000 hombres, y es manejado por una sola persona. Desde que el motor de combustión interna fue incorporado al tractor agrícola, la potencia de éste no ha dejado de aumentar, como lo muestra la gráfica de la figura 17.

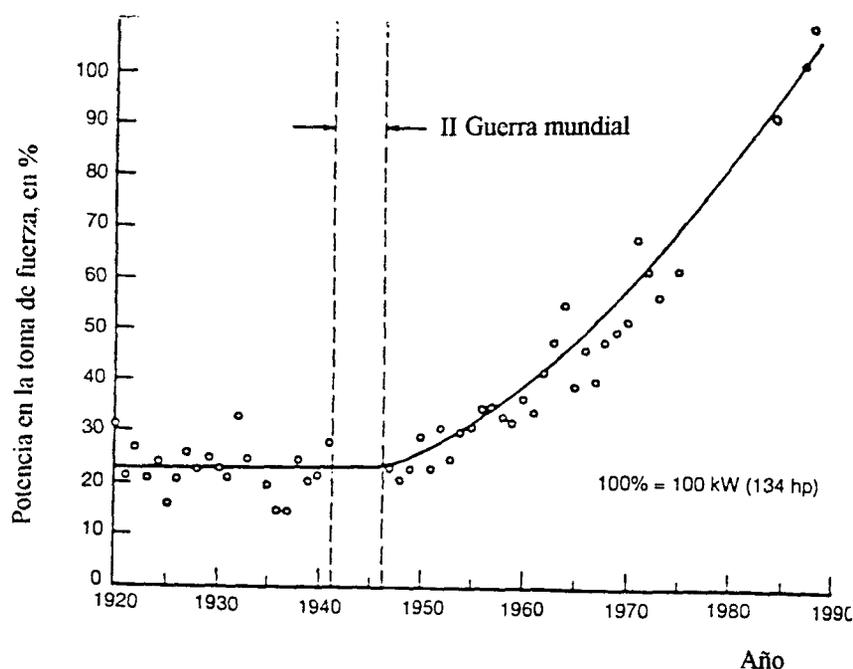


Figura 17. Tendencias en la potencia del tractor en la toma de fuerza, según las pruebas de Nebraska. Fuente: Goering, Carroll E., *Engine and tractor power*, pág. 14

Como Shelton¹¹⁸ sugiriera, además de tal concentración de energía para llevar a cabo un trabajo, sería imposible reunir tal cantidad de hombres (y de animales de tiro) para realizar el trabajo práctico que efectúa una máquina de semejante potencia.

Otro parámetro indicador de la elevación de los niveles de funcionalidad en las máquinas agrícolas, es la tendencia a la disminución del peso del tractor en relación con la potencia entregada. La relación masa/potencia es una medida de este índice, y para los tractores de inicios del siglo XX, que eran muy pesados, esta proporción era del orden de 125 a 165 kg/HP; es decir, aquellos tractores “producían” un HP por cada 125 a 165 kg de su estructura. En los tractores actuales, este índice se ha reducido a valores de entre 35 y 60 kg/HP. Esto significa que se han diseñado motores de mayor potencia, se han utilizado materiales y piezas más livianas y se ha elevado la eficiencia de las máquinas agrícolas, en particular los tractores.

Otros índices de funcionalidad incluyen tendencias como el aumento de la velocidad de trabajo y de la profundidad de labranza del suelo, disminución del gasto de energía para las labores agrícolas, etc. El cuadro 2 muestra un estudio comparativo entre dos formas de labranza para el cultivo de maíz, una mediante tracción animal y la otra mediante el tractor y sus implementos.

Cuadro 2. Comportamiento de las alternativas de labranza en el cultivo de maíz referidas a una hectárea. Fuente: Lara L., A. y Ortiz S., J. Evaluación técnica y económica del motocultor de alto despeje en la mixteca oaxaqueña, en Memorias del XI Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, pág. 76.

OPERACION Y PARAMETRO	YUNTA	MOTO-CULTOR	TRACTOR
BARBECHO			
Velocidad media, km/h	2.00	3.37	5.00
Capacidad de campo, h/ha	32.00	14.19	2.50
Consumo de combustible, l/ha		31.46	22.00
Profundidad, cm	18.00	20.00	25.00
SEGUNDA ESCARDA			
Velocidad media, km/h	2.32	2.00	4.98
Capacidad de campo, h/ha	7.65	5.74	1.38
Consumo de combustible, l/ha		8.88	4.06
Profundidad, cm	20.00	25.00	25.00
SURCADO			
Velocidad media, km/h	2.32	1.98	4.98
Capacidad de campo, h/ha	15.20	11.67	1.60
Consumo de combustible, l/ha		14.80	7.06
Profundidad, cm	25.00	25.00	30.00

En el cuadro anterior, hay una tercera opción entre la técnica tradicional (yunta) y la moderna (tractor): el motocultor, que representa un caso de una tendencia importante en la ingeniería agrícola a rescatar

los instrumentos agrícolas tradicionales, incluso muy antiguos con el arado, para mejorar sus parámetros funcionales mediante la aplicación de los principios y métodos de la ingeniería moderna. Estas tecnologías intermedias están destinadas a productores cuya solvencia económica no es suficiente para adquirir tractores y sus implementos.

Una de las consecuencias del refinamiento de los parámetros de funcionalidad, es la creciente complejidad en la conformación de las máquinas agrícolas. Mientras que un arado egipcio de madera se ensamblaba con 4 o 5 piezas independientes, una cosechadora de granos moderna se compone de unas 35 000 partes ensambladas con precisión. Con esta máquina y unos cuantos accesorios, es posible cosechar unas 100 diferentes especies de semillas, desde un tamaño casi microscópico hasta granos de mayor tamaño, con una proporción de 5 000 a 1 entre los más grandes y los más pequeños.

La necesidad de cambiar de técnicas tradicionales a tecnologías modernas en la agricultura está presionada por el aumento en la densidad de población. A mayor densidad de población en una determinada sociedad, se requieren de técnicas más eficientes para la producción de alimentos; es decir, de técnicas con mayores niveles de funcionalidad. Por ejemplo, para las sociedades del Paleolítico, con densidades de población menores a cuatro habitantes por kilómetro cuadrado (km^2), bastaba la recolección para satisfacer las necesidades alimenticias, y en este caso es de esperar que se requirieran instrumentos parecidos a los presentados en la sec. II.1 de este trabajo. Sin embargo para sociedades con un rango de 4 a 64 habitantes por km^2 , es preciso implementar sistemas de producción agrícola que incluyan algunos instrumentos tradicionales como el hacha, el machete y el azadón. Si la densidad aumenta a un rango de 16 a 64 habitantes por km^2 , se requiere agregar la tracción animal. Para poblaciones con más de 64 habitantes por km^2 se requiere de tracción animal y del tractor con sus implementos.¹¹⁹ Por ello, el aumento de la población que se registró en Europa (y en todo el mundo) a partir de la revolución industrial influyó en el desarrollo de las nuevas tecnologías agrícolas. Lo mismo sucedió en Estados Unidos y otros países que adoptaron las nuevas técnicas agrícolas.

IV.6. El método moderno de aplicación de las ciencias de la ingeniería; un caso particular en la mecanización agrícola

La elevación de los parámetros de funcionalidad alcanzada en las máquinas agrícolas, particularmente en el siglo XX, se debe en gran medida a la sistematicidad en la aplicación de las modernas ciencias de

la ingeniería. En el diseño de las máquinas agrícolas se ha mejorado progresivamente la precisión y el rigor científico en el estudio de las condiciones de trabajo, de tal modo que donde antes sólo se recurría al ensayo y error para la innovación, hoy se recurre a modelos matemáticos y físicos, combinando la manipulación de ecuaciones y el trabajo experimental. Esto ha permitido obtener una gran precisión en las formas, arreglos y funcionamiento de los equipos agrícolas. Considérese por ejemplo el caso de los implementos desarrollados, para laboreo del suelo, como son los arados, cultivadores, rastros, cinceles, subsoleadores y otros. Estos equipos deben ser diseñados de tal modo que, con la menor fuerza posible, sean hundidos y tirados o empujados para abrir surcos, voltear o desmenuzar el suelo. Para resolver este problema, hoy se recurre a una serie de investigaciones sobre el comportamiento del suelo ante la acción de las fuerzas, lo cual llevó a conformar la mecánica de suelos, una de las ciencias de la ingeniería de mayor importancia en la ingeniería agrícola.

El primero en estudiar las condiciones bajo las cuales el suelo puede ser cortado desde un punto de vista científico, fue C. A. Coulomb (1736-1806) quien en 1776 publicó un trabajo en donde propuso una ecuación que establecía que para romper una porción del suelo, habría que vencer dos factores: la fricción interna entre las partículas del suelo y la cohesión entre las mismas. Para ello aplicó la mecánica en una forma muy elemental y llevó a cabo una serie de pruebas experimentales. En 1914, Mohr presentó un conjunto de ecuaciones y un método gráfico adicional para calcular, en un cuerpo sometido a ciertas fuerzas, los planos de las secciones internas en donde se presentan ciertas condiciones que son críticas para que dicho cuerpo se rompa bajo la acción de las fuerzas. En la teoría de la resistencia de materiales,¹²⁰ el efecto de las fuerzas se evalúa por la presión que ejercen en el material, es decir, en términos de fuerza por unidad de área (N/m^2 , Kg/cm^2 , etc.) en la que actúa. Si la fuerza actúa perpendicularmente a la superficie, a la presión resultante se le denomina esfuerzo normal, y se designa como σ , y si la fuerza actúa de manera paralela o tangencialmente a la superficie, se le denomina esfuerzo cortante, y se le simboliza con la letra griega τ . De esta manera, en un cuerpo cualquiera –bajo ciertas condiciones– sometido a un conjunto de fuerzas F_1, F_2, \dots, F_n , como se muestra en la figura 18(a), cualquier porción rectangular se puede considerar que está sometida a un conjunto de esfuerzos internos σ y τ , en dos direcciones perpendiculares entre sí, indicados por los ejes x , y como lo indica la figura 18(b). Mohr encontró la forma de calcular los esfuerzos normales $\sigma_{\theta x}$, $\sigma_{\theta y}$ y cortante τ_{θ} en cualquier plano interno ab a partir de los datos de σ_x , σ_y , τ_{xy} , y el ángulo θ de inclinación del plano, como se muestra en la figura 18(b). También determinó que, para cierto valor del ángulo θ , se presenta una combinación de esfuerzos tal que, uno de los esfuerzos normales ($\sigma_{\theta x}$ y $\sigma_{\theta y}$)

adquiere el máximo valor posible, mientras que el otro toma el valor mínimo posible para cualquier inclinación θ . Estos esfuerzos normales máximo y mínimo, simbolizados por σ_1 y σ_3 respectivamente, se denominan esfuerzos principales, y el valor del ángulo θ en el cual ocurren corresponde al plano principal. Además, en estas condiciones el esfuerzo cortante es nulo.

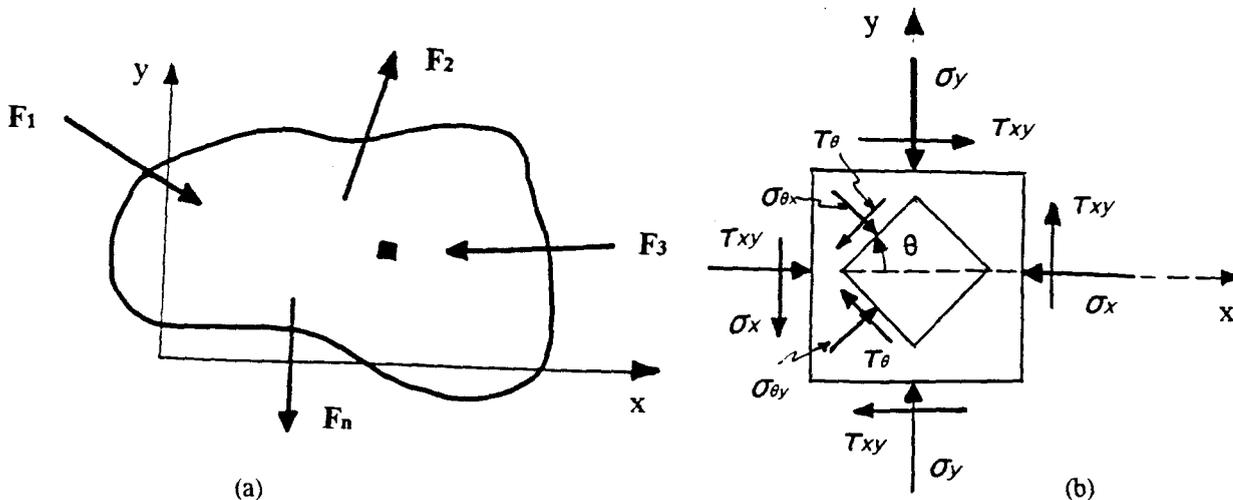


Figura 18

A partir de los trabajos de Coulomb y de Mohr, hoy se dispone de modelos de falla del suelo cuando éste es sometido a esfuerzos, los cuales a su vez son resultado de la aplicación de fuerzas externas, como la que ejercen los instrumentos y máquinas agrícolas. Uno de tales modelos de falla es el que considera que, bajo la acción de los instrumentos agrícolas de corte del suelo, éste se ve sometido a una situación de esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , a partir de los cuales se puede determinar el ángulo θ_f que causará la falla en el plano ff , como se muestra en la figura 19(a).

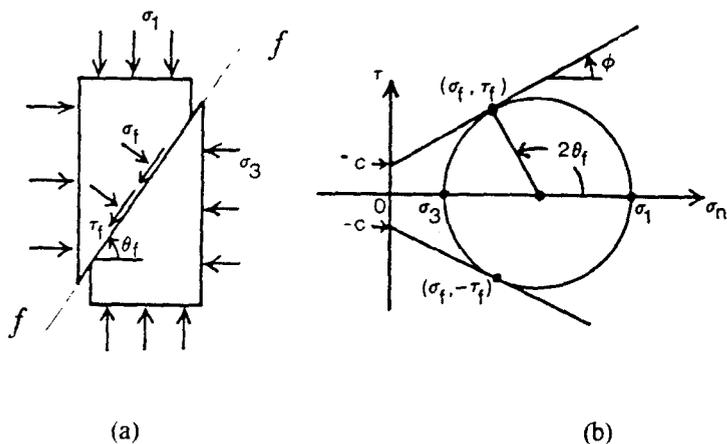


Figura 19

Utilizando y graficando simultáneamente las ecuaciones de Coulumb y de Mohr, en donde los puntos P_1 y P_2 de intersección del círculo de Mohr y las líneas de resistencia límite de Coulomb, se obtiene la figura 19(b), en donde se identifican dos combinaciones de esfuerzos normal y cortante $P_1(\sigma_f, \tau_f)$ y $P_2(\sigma_f, -\tau_f)$ que producen la falla del suelo. Los valores c y θ se determinan de manera experimental para cada tipo de suelo. Los puntos P_1 , y P_2 de falla corresponden en la figura 19(b) a dos valores en realidad del ángulo de falla θ_f , dados por la ecuación:

$$\theta_f = \pm \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right) \quad (1)$$

La ecuación (1) significa que hay dos planos de falla, uno dado por el signo (+) y otro por el signo (-), a partir de lo cual se ha desarrollado un modelo de falla de la porción de suelo ABC bajo la acción de una herramienta de corte como se muestra en la figura 20. En esta figura se advierte que, bajo la acción de la herramienta, se obtiene la falla de porción de suelo ABC en un proceso de deslizamiento de capas de suelo a lo largo de planos de falla en dos direcciones indicadas como η y ε , que corresponden a los dos valores de θ_f en la ecuación (1).

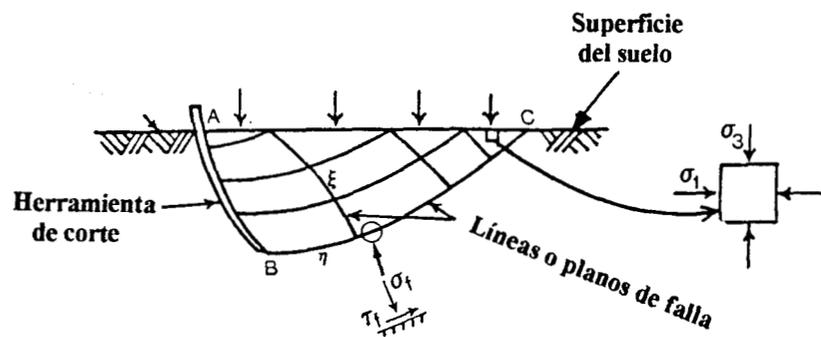


Figura 20

Con estos elementos se analizan las condiciones de falla de la porción de suelo ABC removida por diferentes tipos de herramientas de corte, determinando en cada caso la dirección de los planos de falla η y ε , de tal modo que en función de éstos se determina la fuerza que se requiere aplicar a la herramienta para remover el suelo. Veamos dos casos concretos.

En primer lugar se tiene una herramienta de corte que es plana (recta) y trabaja de manera vertical, a una profundidad d en el suelo, el cual es sometido a una presión superficial q que pudiera ser atribuida

al rodado del tractor, o al paso de los animales de tiro o cualquier otra carga en la superficie. Para calcular la fuerza p que se requiere para remover al suelo con esta herramienta, se aplican las ecuaciones de Coulmb y de Mohr, quedando el modelo en la forma indicada en la figura 21.

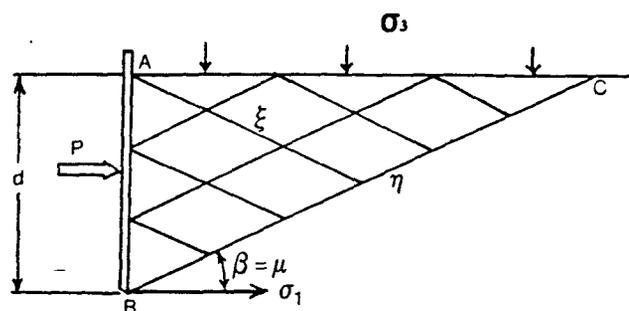


Figura 21

Resolviendo el conjunto de ecuaciones mencionado para estas condiciones, se obtiene la siguiente ecuación para el cálculo de la fuerza p

$$p = \gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q \quad (2)$$

donde p = fuerza total requerida en la herramienta

γ = densidad del suelo

g = aceleración de la gravedad

d = profundidad de la herramienta

c = resistencia del suelo debida a la cohesión

q = presión superficial sobre el suelo, vertical

N_γ, N_c, N_q , = factores que dependen de la resistencia del suelo debido a la fricción, geometría de la herramienta y propiedades que relacionan al tipo de herramienta con la resistencia del suelo

Los valores de N_γ, N_c , y N_q se presentan en la gráfica de la figura 22. El valor de M está dado por la ecuación

$$M = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad (3)$$

donde Φ es un valor que caracteriza la magnitud de la fricción interna entre las partículas del suelo, y es un dato que identifica a cada tipo de suelo.

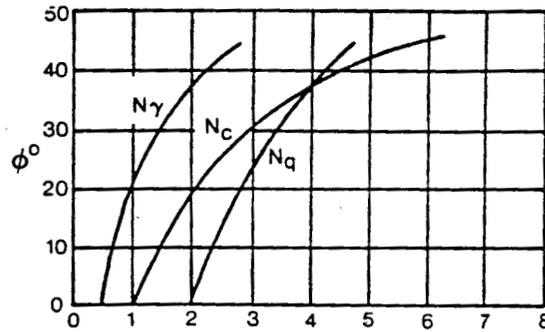


Figura 22

Si el mismo instrumento de corte plano, trabajara inclinado en un ángulo α como lo indica la figura 23, la ecuación para determinar p está dada ahora por la ecuación

$$P = cdN_c + qdN_q \quad (4)$$

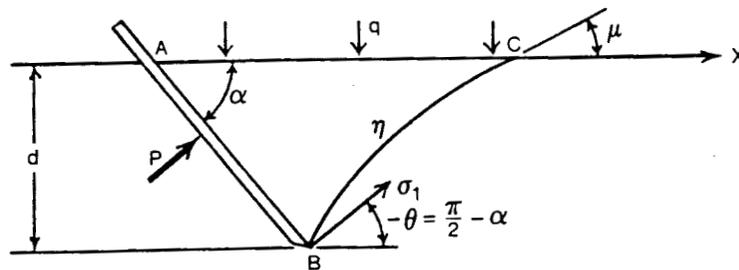


Figura 23

Algunos valores de N_c y N_q están dados en el cuadro 3. Variando parámetros como la forma de la herramienta de corte, el tipo de suelo, las condiciones de carga, la velocidad de trabajo, y otros factores, se han obtenido resultados que sirven de base para el diseño de muchos tipos de herramientas para cortar, pulverizar, voltear o desplazar tierra.

Cuadro 3. Valores de N_c y N_q para el tipo de herramienta de corte considerado. Fuente: Mckyes, Edward., *Soil cutting and tillage*, pág. 42.

A^*	$\phi = 0$		$\phi = 15^\circ$		$\phi = 30^\circ$	
	N_c	N_q	N_c	N_q	N_c	N_q
30	-0.19	2.00	-0.23	1.94	-0.36	1.79
60	1.10	1.15	1.22	1.48	1.28	1.89
90	2.00	1.00	2.61	1.70	3.46	3.00

Para el diseño de las vertederas de los arados, como caso particular de muestra, se ha llegado a especificar los valores más adecuados algunos parámetros para construirlos más eficientes. De acuerdo a la simbología de la figura 24, Soehne¹²¹ concluyó que:

- El ángulo de intersección de la reja δ_1 debe estar entre 15 y 17° en la punta de la reja, y entre 8 y 10° al final de la misma.
- El ángulo de corte de la reja ϕ_1 , debe estar entre 35 y 38°.
- El ángulo en lo alto de la reja ϕ_5 debe estar entre 23 y 27° al final de la verdadera.
- El ángulo δ_5 debe aumentarse para ocasionar un fuerte giro e inversión del suelo a grandes velocidades.

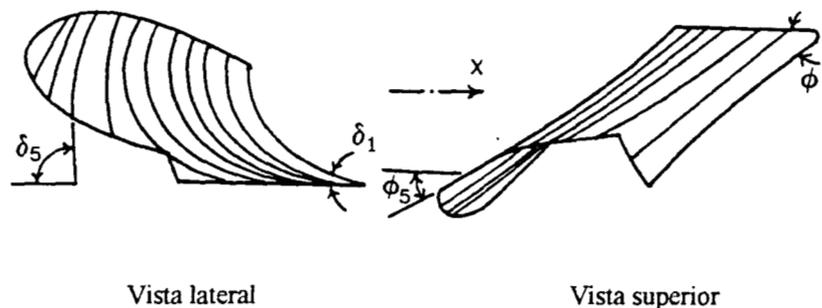


Figura 24

La ciencia se utiliza hoy como base para el diseño de todas las partes de las máquinas agrícolas, e incluso para aspectos como el mejoramiento del confort del operador. Por ejemplo, Fanger¹²² propuso una ecuación para predecir la comodidad del operador de un tractor agrícola, con el fin de manipular una serie de variables que conduzcan a un diseño más ergonómico del tractor. Esta ecuación tiene la forma:

$$F(H / A_{Du}, I_{cl}, t_a, t_{mt}, p_a, v) = 0 \quad (5)$$

donde:

H/A_{Du} = producción de calor interno producido por unidad de área de superficie del cuerpo

I_{cl} = resistencia térmica de la ropa

t_a = temperatura del aire

t_{mrt} = temperatura media radiante

P_a = presión de vapor de agua en aire ambiental

v = velocidad relativa del aire

Estos ejemplos, de los cuales hay una gran abundancia en la ingeniería agrícola moderna, muestran claramente el papel que la ciencia desempeña hoy en la solución de los problemas prácticos de la técnica agrícola. En la ingeniería moderna, la utilización de principios y métodos de la ciencia (sobre todo las ciencias físicas) es un indicador del rigor y la seriedad con que se abordan los problemas técnicos, aunque ciertamente el trabajo experimental juega un papel más importante en aquellos problemas para los cuales las teorías científicas son insuficientes o demasiado complejas. Pero sería exagerado e inexacto definir a la ingeniería moderna como la simple aplicación de la ciencia (ver sec. I.3), como se suele leer en algunos textos.

V. FRANCIS BACON Y LA TECNOLOGIA MODERNA

La idea de vincular a la ciencia con la utilidad práctica en realidad puede ubicarse desde el inicio de la ciencia moderna. Francis Bacon (1561-1626), uno de los principales fundadores del concepto de una ciencia basada en la experimentación y la observación cuidadosa de la naturaleza, diferente de la concepción medievalista, sostenía que la nueva ciencia tenía que encontrar su gran aliada en la técnica: colaborando ciencia y técnica, podrán volverse fértiles recíprocamente y harán más fácil la vida del hombre. Por ello muchos consideran a Bacon como el primer filósofo de la técnica, a la vez que filósofo de la ciencia por la gran influencia que tuvo en la revolución científica del siglo XVII. En aquella época, en plena rebelión contra las enseñanzas de Aristóteles y de la ciencia medieval, la situación era como lo ha expuesto Butterfield:¹²³ “Los hombres de ciencia clamaban por la revolución; no exigían solamente una explicación de las anomalías existentes, sino de una nueva ciencia y un nuevo método.”

Muchos pensadores se dedicaron a estas cuestiones, destacando algunos como Bacon, cuya doctrina se conforma de dos ideas principales: el problema del método científico y la significación de la técnica dentro de la vida humana. Ambicionaba sistematizar y organizar todo el saber científico y buscar su aplicación práctica en una escala hasta entonces no imaginada, para lo cual elaboró una severa crítica, contra Aristóteles principalmente, considerando que su fama había impedido el progreso de la ciencia aplicada. Bacon reconocía que, ni en la antigüedad ni en la Edad Media se había advertido aún la posibilidad de mejorar las condiciones de vida humana gracias a las invenciones técnicas, basadas en la ciencia. Por ello, de la ciencia antigua Bacon¹²⁴ decía que:

Por lo que a la utilidad se refiere ha de decirse abiertamente que este saber que hemos heredado sobre todo de los griegos parece más bien una infancia de la ciencia y que tiene lo propio de los niños, a saber: presto siempre al parloteo, es incapaz e inmaduro para la generación, pues es fértil en controversias, pero estéril en obras.

La tradición científica, decía Bacon, había sido una tradición de maestros y discípulos, no de inventores y descubrimientos. Toda la filosofía de aquella época también ignoraba la utilidad que podría obtenerse del conocimiento:

La filosofía actualmente vigente esconde en su seno ciertas afirmaciones y ciertas creencias que, si las consideramos con más atención, pretenden persuadir completamente a los hombres de que no debe esperarse del arte o de la acción humana nada difícil o nada que sea de algún poder y eficacia sobre la naturaleza.¹²⁵

En cambio, las artes mecánicas habían seguido desarrollándose por su cuenta, aunque se encontraban en un estado muy incipiente, debido a que su estudio científico no había sido aún abordado. Bacon

pensó que con la nueva ciencia, de la cual se consideraba fundador, esta situación debería cambiar. La nueva ciencia debería estar orientada fundamentalmente hacia la utilidad práctica. En adelante, el saber tendría que ser poder, dominio del hombre sobre la naturaleza. La finalidad de la ciencia habría de ser la utilidad, lo cual supone, a la vez, un deber social. Bacon proponía obedecer a la naturaleza en el conocimiento con la mira de poder dominarla en la técnica. La fuente del poder humano es el conocimiento técnico, al servicio de la vida humana:

El conocimiento no ha de buscarse ni porque goce la mente, ni con fines de emulación, ni para ser superiores a otros, ni por ganancia, fama o poder, o por cualquiera de estas cosas inferiores; ha de buscarse para beneficio y uso de la vida...Al igual que en religión se nos advierte que demos nuestra fe mediante obras, así en filosofía, según la misma regla, debe juzgarse el sistema por sus frutos, y denunciarlo como frívolo en caso de que fuera estéril; más específicamente si, en lugar de frutos – racimos y olivas -, luciese espinas y zarzas de disputa y debate.¹²⁶

La nueva ciencia debería ir más allá de las discusiones intelectuales propias del escolasticismo medieval, deberían producir obras concretas:

El fin que esta ciencia nuestra se propone es el descubrimiento no de argumentos, sino de artes; no de cosas conformes a los principios, sino de los principios mismos; no de razones probables, sino de designaciones e indicaciones para la acción...Pues allí se vence y se encadena al adversario en la disputa,...a la naturaleza en acción...¹²⁷

Las nuevas técnicas deberían estar basadas en aplicaciones del saber científico, a diferencia de los antiguos, puesto que en el pasado, las aplicaciones del conocimiento a los negocios prácticos del hombre no habían sido sistemáticas, sino por casualidad, cuando se daban, y muchas veces mantenidas en secreto. Como lo planteó Dubos, Bacon “confió más en el sentido práctico de la humanidad que en las pretensiones intelectuales”, y fue un gran impulsor de la nueva ciencia basada en estos ideales. Esto no significa que hubiera sido el primero en proponer la utilidad práctica de la ciencia. Pero puede ser considerado como el mayor impulsor de esta orientación práctica de la ciencia moderna, dada la influencia que tuvo en científicos y filósofos que destacaron en la revolución científica del siglo XVII.

Las sociedades científicas más importantes fundadas en el siglo XVII se inspiraron en la visión que Bacon tenía de la ciencia, orientada hacia la práctica, aliada de la técnica. Esta situación influyó en los nuevos científicos, en particular en aquellos relacionados con las ciencias físicas y las matemáticas, para quienes la relación de los problemas científicos con los de la técnica se volvió cada vez más cotidiana. Algunas de estas sociedades que se encargaron de organizar la investigación científica. Incluyeron en sus documentos fundacionales la pretensión explícita de abordar los problemas relacionados con las artes y los oficios, y entre sus miembros destacaron personalidades allegadas a la naciente industria. De esta manera, el pensamiento de Bacon jugó un papel destacado en la conjunción entre los conocimientos científico y técnico, que comenzó a hacerse visible en el siglo XVIII, y que

alcanzó la magnitud del siglo XIX, tal como se aprecia en el caso de la técnica agrícola. Dos ejemplos notables fueron la *Royal Society* en Inglaterra y la *Académie des Sciences* en Francia.

La Royal Society fue fundada en 1666 en Londres. Uno de sus primeros miembros fue el químico Robert Boyle (1627-1691), quien afirmaba haber estudiado filosofía, mecánica y agricultura en aquella institución, de la cual decía que “no aprecia el conocimiento más que en la tendencia que tiene a usarse”¹²⁸ Tan sólo cinco años después de fundada esta sociedad, un obispo llamado Thomas Sprat escribió ya la historia sobre ella, en donde afirmó que algunos de los escritos de Francis Bacon explicaban los propósitos de la sociedad mejor que cualquier cosa que él pudiera escribir. Al parecer, los objetivos y los contenidos delineados en *La Nueva Atlántida* de Bacon fueron la fuente principal de inspiración para establecer los propósitos y características de la Royal Society, en cuyo historial se afirma que: “Bacon tuvo una clara visión de todas las posibilidades de esta nueva institución...y ninguna otra obra sería más apta para servir de prefacio a la historia de la Royal Society que cualquiera de sus escritos.”¹²⁹

En la Nueva Atlántida, publicada en 1627, Bacon imagina un modelo de sociedad humana regida en todos sus aspectos por las aplicaciones de la ciencia en continuo avance. Para ello, habría sido fundada la *Casa de Salomón*, una institución *-la asociación más noble que hay sobre la faz de la tierra-* cuya función sería la de dirigir todos los asuntos de aquella sociedad de manera científica. De esta manera la salud, la agricultura, las comunicaciones, la educación y todos los asuntos del quehacer humano, incluso la política, estarían en manos de especialistas en las más diversas ramas de la “ciencia activa”, es decir, la ciencia aplicada. Tales especialistas corresponderían a los modernos ingenieros, agrónomos, arquitectos, astrónomos, médicos, geólogos, etc. Algunos pasajes de esta obra muestran las aplicaciones de la ciencia a la técnica que Bacon imaginó (o propuso):

Tenemos fábricas de máquinas en las que son preparadas máquinas e instrumentos para toda suerte de movimientos. Allí producimos y practicamos movimientos más veloces que cualquiera de los vuestros...y para hacerlos y multiplicarlos más fácilmente y con poca fuerza mediante ruedas y otros medios, más fuertes y más potentes que los vuestros...También presentamos piezas de artillería, instrumentos de guerra y máquinas de toda clase...Imitamos también el vuelo de las aves, y tenemos condiciones para volar por el aire. Tenemos barcos y botes para ir bajo el agua, y atravesar los mares...Tenemos diversos y curiosos relojes, y otros, como movimientos de retroceso, y algunos de movimiento continuo...Tenemos también gran cantidad de otros variados movimientos, de extraordinaria regularidad, fuerza y sutileza.¹³⁰

En particular, sobre agricultura y alimentación, Bacon pensó en aplicar la ciencia para cuestiones como las siguientes:

Tenemos gran variedad de compuestos y abonos para fertilizar la tierra...grandes lagos, salados y de agua dulce, que usamos para obtener nuestros peces y aves...variados y grandes huertos y jardines en que no respetamos tanto la belleza como la variedad de los suelos, apropiados para los diversos árboles y yerbas...ensayamos igualmente

toda clase de inoculación e injertos, tanto de árboles silvestres como de árboles frutales, lo cual produjo muchos efectos. En los mismos huertos y jardines hacemos artificialmente que los árboles y las flores maduren más temprano o más tarde que como corresponde y que crezcan y se reproduzcan más rápidamente de lo que lo hacen naturalmente. Los hacemos también, artificialmente, de mucho mayor tamaño de lo que lo son por naturaleza, y sus frutos mayores, más dulces y de diferente sabor, olor, color y forma que los naturales. Y a muchos de ellos los hacemos de uso medicinal.¹³¹

Bacon imaginó asimismo en la Nueva Atlántida a los investigadores encargados de aplicar la ciencia, organizados y especializados, con laboratorios de investigación y simulación de los procesos naturales y para el ensayo de nuevas aplicaciones. El modelo de sociedad propuesto por Bacon en aquellos escritos, en el cual casi todos los problemas del hombre serían resueltos por las aplicaciones de la ciencia, resultó utópico en muchos aspectos. Bacon pensaba que la técnica, sustentada en la ciencia, traería la felicidad a los hombres debido a que todos los problemas materiales serían resueltos en un futuro. Era un verdadero creyente de las posibilidades prácticas de la ciencia, las cuales plasmó en sus escritos con verdadera pasión, gracias a lo cual influyó en una gran cantidad de científicos que formaron parte de instituciones como la Royal Society. Por ejemplo, en el preámbulo a los estatutos de esta institución, escrito por Robert Hooke en 1663, se planteaba claramente que:

El objetivo de la *Royal Society* es : Mejorar el conocimiento de las cosas naturales, y de todas las Artes útiles, las Manufacturas, las prácticas Mecánicas, los Artificios y las Invenciones a través del Experimento (sin entrometerse con la Teología, la Metafísica, la Moral, la Política, la Gramática, la Retórica o la Lógica).¹³²

Por ello, en la Royal Society, en sus inicios al menos, se admitían como miembros a estudiantes, soldados, tenderos, granjeros, cortesanos, marineros, etc. Se fomentaban tanto las ciencias abstractas como las actividades e industrias prácticas. La visión y las expectativas acerca de las posibilidades de la ciencia eran ahora diferentes a unos cuantos siglos antes. La ciencia comenzó a ser vista realmente como un medio para resolver problemas cotidianos del hombre, y no solo como una actividad meramente intelectual.

La *Académie des Sciences* en Francia también se inspiró en las ideas de Bacon acerca de la utilidad práctica de la ciencia. Fue fundada en 1671 y financiada directamente por el gobierno francés, tanto para sostener a los académicos como para costear las actividades experimentales y el equipo físico necesario para ello. Según palabras de Dubos, esta academia francesa se acercó aún más a los sueños utópicos de Bacon que la Royal Society, ya que tenía oficialmente la responsabilidad de estudiar problemas técnicos de interés nacional, realizar trabajos experimentales en varios campos y difundir los resultados de la investigación científica.¹³³ El sueño de Bacon de ver a las actividades científicas financiadas directamente por el estado se materializaba ahora en una institución, en la cual trabajaban especialistas en diversos campos de aplicación de las ciencias.

En el siglo XVII, entre 1751 y 1772, fue publicada en Francia la *Encyclopédie des Arts, Sciences et Métiers*, a cargo de Diderot (1713-1784) y D'Alembert (1717-1783) y a la participación de una gran cantidad de filósofos. Esta obra, escrita en 28 volúmenes, se convirtió en el más famoso documento de literatura científica de aquella época, y se constituyó en un diccionario analítico de las ciencias, las artes y los oficios. En el prefacio del primer volumen de esta obra, Diderot y D'Alembert hicieron explícita su deuda intelectual hacia personalidades como Descartes, Newton, Locke, y muy especialmente a Francis Bacon:

A la cabeza de estos héroes ilustres colocamos merecidamente al inmortal Francis Bacon...cuyas obras, aunque con justicia estimadas, son demasiado poco conocidas, y más merecen ser consultadas que elogiadas. Al considerar las justas y varias opiniones de este hombre prodigioso, la multiplicidad de sus objetos, el vigor de su estudio, sus imágenes sublimes, su exactitud extrema, sentimos la tentación de considerarlo el máximo, el más universal y el más elocuente de los filósofos...Es a este gran autor al que debemos, más que a nadie, nuestro plan enciclopédico.¹³⁴

En la *Encyclopédie* se había recogido claramente la orientación técnica que Bacon propusiera para la ciencia, y el respeto hacia las artes mecánicas al mismo nivel que el conocimiento teórico. Diderot escribió en la *Encyclopédie*:

Concedamos, por último, a los artistas lo que se merecen. Las artes liberales...tienen ahora que emplear la voz que les quede para celebrar las artes mecánicas. Corresponde a las artes liberales elevar a las mecánicas del desdén de que las ha hecho padecer el prejuicio, y el patrocinio de las leyes debe sacarlas de la pobreza en la que languidecen todavía. Los propios artesanos se han tenido por despreciables porque la gente los ha mirado desdeñosamente: enseñémosles a tener mejor opinión de sí mismos; es la única manera de obtener de ellos resultados más cercanos a la perfección. Necesitamos un hombre que suba a las academias y descienda a los talleres y compile materiales para un libro que persuada a los artesanos a leer, a los filósofos a reflexionar por vías útiles y a los grandes a hacer siquiera cierto uso que valga la pena de su autoridad y de su riqueza.¹³⁵

De esta manera, los representantes de la ciencia moderna, a diferencia de los de la ciencia antigua y medieval, tuvieron desde el principio una conciencia de la relación entre el conocimiento científico y su potencial en cuanto a su utilidad práctica. Muchas de las investigaciones de científicos que pertenecieron a sociedades como las mencionadas, y muchas más que se extendieron por toda Europa y en Estados Unidos, contribuyeron a la conformación de las más diversas ciencias de la ingeniería, sobre todo desde el siglo XIX en adelante, tal como ha quedado manifiesto en el caso de la técnica agrícola. Ejemplos de algunos de estos científicos son Newton, Hooke y D'Alembert.

Así, la conjunción de conocimiento científico y técnico tradicional, que comenzó en el siglo XVIII y alcanzó niveles cotidianos en el siglo XIX, se estuvo gestando de alguna manera desde el inicio mismo y concepción de la misma ciencia moderna, debido en gran parte al pensamiento de Francis Bacon y a su enorme influencia. La ciencia moderna nació ya con objetivos de alcance práctico y no solo con pretensiones intelectuales, y ello facilitó sin duda la posterior unión que se daría con la técnica. En la

técnica por su parte, también se estaban dando condiciones para requerir la asistencia de la ciencia en los problemas cada vez mas complejos que se estaban tratando de resolver.

VI. CIENCIA Y METODOLOGIA DE DISEÑO EN LA INGENIERIA MODERNA

De las varias maneras en las cuales el conocimiento científico se incorporó al conocimiento técnico para resolver los problemas prácticos, una de ellas, que es notable en la ingeniería, ha sido a través de la metodología de diseño o proceso de diseño en la ingeniería.

VI.1. El diseño en la ingeniería

La palabra “diseño” proviene del latín “*designare*”, que significa “*señalar o marcar*”. Una formulación muy general de este concepto es la que plantea Shigley (1994), para quien diseñar es formar un plan para satisfacer una necesidad humana.¹³⁶ Una definición más propia de este concepto en el contexto de la ingeniería es la que presenta Norton:

El diseño en ingeniería ha sido definido como el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el objeto de determinar un dispositivo, un proceso o un sistema con detalles suficientes que permitan su realización.¹³⁷

El diseño comprende las actividades que dentro de la ingeniería se realizan para el desarrollo de nuevos medios técnicos, para buscar soluciones técnicas a los problemas prácticos. Es tan importante el diseño que, para la mayoría de los ingenieros, es la herramienta más importante con que cuenta la ingeniería. Por ejemplo, Krick asegura que el diseño es la actividad primordial de la práctica de la ingeniería.¹³⁸ Opiniones parecidas a ésta son comunes en los textos de diseño en ingeniería.

El diseño es un procedimiento, un método propio de la ingeniería que comprende una serie de fases a través de las cuales se recurre a hipótesis, cálculos, especificaciones, criterios y otras herramientas de carácter conceptual o físicas, para definir las características de un producto técnico que resuelve un problema planteado. Esta secuencia de pasos se conoce como metodología de diseño, o proceso de diseño, y por su importancia como herramienta metodológica para el ingeniero, incluso ha sido comparada dentro de la ingeniería con el método científico, pues en una analogía se considera que la metodología de diseño es tan importante para la solución de problemas técnicos, como el método científico lo es para la solución de problemas científicos.

La secuencia de pasos que comprende la metodología de diseño no es un consenso entre los ingenieros. Distintos autores, según su propia experiencia y criterio, han propuesto desde tres hasta 25 fases. Sin

embargo, es grande la similitud entre las propuestas, de tal suerte que la metodología mostrada en la figura 25 es representativa de las distintas versiones comunes en los textos de diseño en ingeniería. De cualquier manera, la metodología de diseño, como plantea Dixon debe utilizarse de manera flexible como una guía y no como un ritual. En esto se parece al método científico.

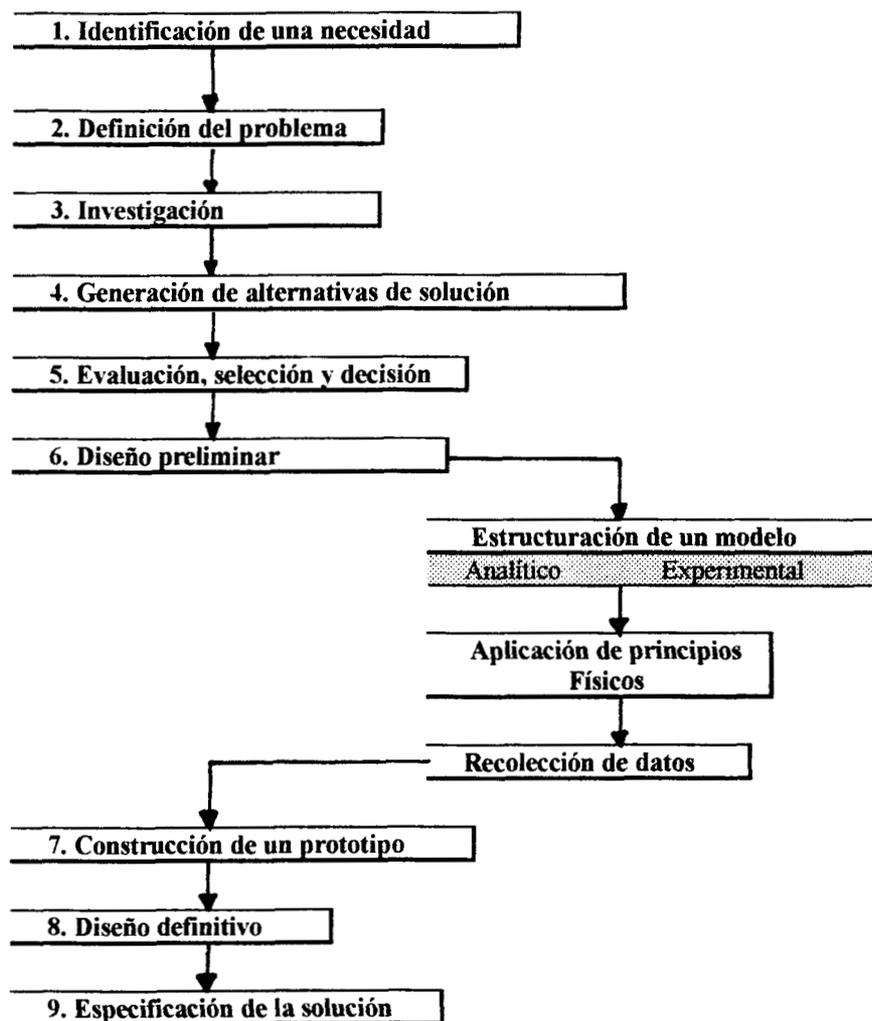


Figura 25. Metodología de diseño en la ingeniería.

Como se verá con mayor detalle, el conocimiento científico está insertado en la metodología de diseño, principalmente en las fases número 3 y 6, aunque de alguna manera interviene también en otras etapas. A continuación se describe brevemente en qué consiste cada fase. Se aborda con especial interés la etapa 6, en especial lo que concierne a la elaboración de un modelo matemático para auxiliar la solución del problema, dado que es precisamente en esta fase donde más se aprecia el papel de la ciencia en la solución de los problemas técnicos que se abordan en la ingeniería moderna. De esta

manera, se aprecia el papel de la ciencia en la solución de problemas prácticos, lo cual permite comprender mejor el lado práctico de la ciencia, tal como es el propósito general de este trabajo.

VI.2. Identificación de una necesidad

Generalmente se asume que esta primera fase consiste en detectar o recibir de parte de alguien, información del entorno relativa o alguna carencia, incomodidad, dificultad, o una sensación de que algo no está bien, o podría estar mejor. La sociedad en general, o un grupo o sector de ella, o un individuo particular pueden ser fuentes para la detección de necesidades. No se considera importante o necesario en esta fase expresar la necesidad en enunciados muy precisos, de modo que un enunciado suficiente para identificar la necesidad es algo así como: “Lo que se necesita es...”, por ejemplo: “Se necesita extraer las semilla del tomate”, o “Se necesita cosechar la cebolla de otra forma”.

VI.3. Definición del problema

En esta fase se procede a cambiar el enunciado general de la fase anterior, a un enunciado muy específico. Una forma común es formular un enunciado en términos de dos estados A y B, en base a parámetros que puedan medirse o calcularse, es decir, de tal modo que estos dos estados A y B sean cuantificables, aunque en ocasiones esto es muy difícil. El estado A identifica la situación actual o inicial, mientras que el estado B define la situación a la cual se quiere llegar o final, como si el problema hubiera sido ya resultado, aunque no se tenga aún idea alguna de cómo se va a resolver.

En la definición del problema deben identificarse cuáles de todos los parámetros que intervienen, determinan o limitan los rasgos esenciales sobre los que podrían plantearse soluciones en una etapa posterior, dado que son éstos los parámetros que definen los estados A y B. Por ejemplo, en un caso concreto donde la necesidad fue identificada como “se necesita extraer las semillas del tomate”, el problema fue formulado como: “desarrollar una máquina o equipo que permita disponer de la semilla de tomate de cáscara, ya cosechado, de una forma tal que se facilite su limpieza y/o beneficio”.¹³⁹ Los estados A y B para este caso fueron definidos como se ilustra en la figura 26. La caja con el signo de interrogación muestra que, por ahora no se sabe cómo será el artefacto que permita pasar del estado A al estado B. Usualmente se le denomina “caja negra”.

En la definición del problema también se ponen en claro el conjunto de restricciones o condiciones que la solución deberá cumplir, de manera cuantitativa también. Para el ejemplo de las semillas de tomate, una restricción es que el costo final del artefacto no supere los \$ 8 000.00, mientras que otra establece que la máquina resultante debe ser operada por un máximo de dos personas, y una más es que la máquina opere a partir de un voltaje mínimo de 120 volt y un máximo de 240 volt.

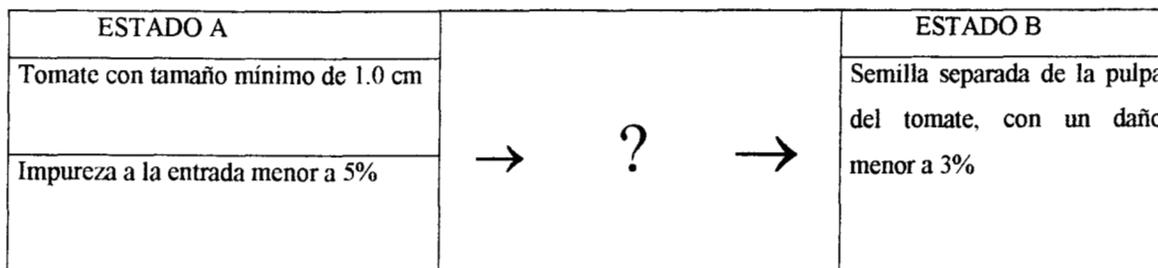


Figura 26

Finalmente, la definición del problema también comprende la especificación de un conjunto de condiciones para las cuales la solución alcance niveles satisfactorios. Estas condiciones, llamadas criterios de diseño, son comunes para cualquier solución técnica. Toda solución a cualquier problema de diseño se apega más a unos criterios de diseño que a otros. Algunos criterios típicos de diseño son: el costo de construcción, la seguridad humana, facilidad de operación y reparación, vida útil, estética, etc. Lo importante es que, cuando se defina un problema de diseño, se haga explícito cuáles son los criterios de diseño que tienen preferencia sobre el resto. Para el ejemplo de la extracción de semilla de tomate, los criterios de diseño relevantes fueron la economía de fabricación, facilidad de manejo, mantenimiento y reparación, vida útil del equipo, seguridad y sencillez de la solución. En la selección de estos criterios hay un alto grado de subjetividad. Precisamente se llaman “criterios” porque su elección es una consideración personal del diseñador.

VI.4. Investigación

En esta fase se recopila toda la información que sea posible en relación al problema que se busca resolver. Es común enfocar la búsqueda en libros técnicos, patentes, empresas, publicaciones técnicas y centros de información especializada. Se considera una etapa crítica porque, de no llevarse a cabo esta búsqueda antes de comenzar a proponer soluciones, se corre el riesgo de pasar por alto información que podría facilitar la solución. Por ejemplo, es frecuente que el diseño de nuevos artefactos se base en

analogías con dispositivos o máquinas ya existentes. Para el problema de la extracción de semillas de tomate, en esta fase fue recopilada información que incluye aspectos como: métodos manuales y métodos industriales existentes para extraer semilla, tales como separación por fermentación, por carbonato sódico, con ácido hidroclicórico, y una máquina diseñada en Irán para este propósito; también fueron investigadas algunas propiedades físicas y químicas del tomate que se deben tener en cuenta.

Gran parte de la información buscada y recopilada en esta etapa, corresponde a datos técnicos ordenados, producto de la acumulación de muchos años de experiencia técnica. Tal es el caso de las patentes, normas, datos, sobre materiales, etc. Es ésta la clase de información no proveniente, al menos directamente, de los resultados de la investigación científica, sino del conocimiento técnico acumulado y ordenado, sin el cual el diseño en la ingeniería pierde su efectividad para la solución de problemas prácticos. Aunque también es cierto que mucho de la información sí proviene de la actividad científica; tal es el caso de los datos relativos a las propiedades físicas y biológicas del tomate del ejemplo, muchas de las cuales son conocidas como resultado de investigaciones científicas en campos como la biología y la química.

VI.5. Generación de alternativas de solución

Con base en la investigación realizada, se procede ahora a proponer todas las posibles formas de solución del problema. No se detallan cada una de las alternativas propuestas, sino que se plantea la configuración general del artefacto, máquina o proceso, indicado sobre todo de qué partes se compone y cómo funcionaría. Para el ejemplo de las semillas de tomate, fueron propuestas al menos tres alternativas de solución, aunque es común que se genere un número mayor en los problemas de diseño.

VI.6. Evaluación y selección

De las alternativas de solución propuestas en la fase anterior, se tiene que seleccionar aquella que, en base a los criterios de diseño y restricciones establecidas en la fase 2 (Definición del problema) resulte la más conveniente. La evaluación consiste en comparar las diversas alternativas para seleccionar la más adecuada.

Existen varios métodos para evaluar las alternativas de solución disponibles, de los cuales aquí se presenta uno para ilustrar sobre toda la mezcla de experiencia, conocimientos y subjetividad que se presenta en esta fase para tomar la decisión más importante del proceso de diseño: elegir aquella alternativa que será desarrollada como la solución del problema.

En el método de evaluación y selección que aquí se presenta, el diseñador asigna un valor numérico a cada uno de los criterios de diseño establecidos en la fase 2, utilizando para ello una escala conveniente, que en este caso va de cero a uno, donde el cero corresponde una importancia nula. Para el ejemplo de las semillas de tomate, los valores asignados a los criterios de diseño que se habían establecido antes son los que se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4

	Importancia asignada N
Economía de fabricación	1.0
Seguridad	0.9
Facilidad de manejo	0.9
Facilidad de mantenimiento	0.8
Vida útil	0.7
Sencillez	0.7

El paso siguiente consiste, en este método, en asignar un valor para cada alternativa de solución disponible en cada uno de los criterios de diseño. Para el ejemplo de las semillas de tomate, como se dijo antes, se propusieron tres diferentes alternativas de solución, consistentes en tres tipos diferentes de máquinas para llevar a cabo la separación de la semilla de la pulpa del fruto, que se designan aquí como A1, A2 y A3. El valor asignado para cada alternativa en cada uno de los criterios de diseño 1, 2... 6, se expresa en la escala conveniente de cero a uno, donde cero significa que la alternativa es muy deficiente en el criterio considerado, y uno significa que la alternativa cumple completamente con el criterio en cuestión. Para el ejemplo considerado de las semillas de tomate, los valores de las alternativas A1, A2, y A3 para cada criterio de diseño 1, 2, ... 6 se presentan en el cuadro 5.

Los cuadros 4 y 5 se combinan en el cuadro 6 para obtener un valor determinado función de criterio para cada una de las alternativas de solución. Los valores de función de criterio para cada alternativa están dados de función de criterio para cada alternativa están dados por:

Cuadro 5

Criterio de diseño	Alternativas de solución		
	A 1	A 2	A 3
Economía de fabricación	0.3	0.8	0.8
Seguridad	0.8	0.9	0.8
Facilidad de manejo	0.5	0.8	0.8
Facilidad de mantenimiento	0.8	0.6	0.9
Vida útil	0.9	0.9	0.9
Sencillez	0.6	0.6	0.9

$$FC1 = (C1)(A1) + (C2)(A1) + (C3)(A1) + (C4)(A1) + (C5)(A1) + (C6)(A1)$$

= función de criterio para la alternativa de solución A1

$$FC2 = (C1)(A2) + (C2)(A2) + (C3)(A2) + (C4)(A2) + (C5)(A2) + (C6)(A2)$$

= función de criterio para la alternativa de solución A2

$$FC3 = (C1)(A3) + (C2)(A3) + (C3)(A3) + (C4)(A3) + (C5)(A3) + (C6)(A3)$$

= función de criterio para la alternativa de solución A3

Cuadro 6

CRITERIO DE DISEÑO	(Ci) (A1)	(Ci) (A2)	(Ci) (A3)
Economía de fabricación	(C1) (A1) = 0.30	(C1) (A2) = 0.80	(C1) (A3) = 0.80
Seguridad	(C2) (A1) = 0.72	(C2) (A2) = 0.81	(C2) (A3) = 0.72
Facilidad de manejo	(C3) (A1) = 0.45	(C3) (A2) = 0.72	(C3) (A3) = 0.72
Facilidad de mantenimiento	(C4) (A1) = 0.64	(C4) (A2) = 0.48	(C4) (A3) = 0.72
Vida útil	(C5) (A1) = 0.63	(C5) (A2) = 0.63	(C5) (A3) = 0.63
Sencillez	(C6) (A1) = 0.42	(C6) (A2) = 0.42	(C6) (A3) = 0.63
Función de criterio	FC1 = 3.16	FC2 = 3.86	FC3 = 4.22

Del cuadro 6 se observa que $FC3 > FC2 > FC1$, es decir, que el valor más elevado de las funciones de criterio corresponde a la alternativa de solución A3, por lo cual ésta es la que se seleccionó para desarrollarse como solución al problema de diseño definido en la fase 2.

Es importante señalar que la asignación de valores numéricos de las tablas 4 y 5 son en base a consideraciones subjetivas del diseñador. Por ejemplo, para asignar a C1 el valor de uno en el cuadro 4, la justificación fue que “el diseño económico define el aspecto de costos de fabricación y comercialización de la máquina, lo cual es primordial en todo proyecto y por tanto consideramos el valor numérico superior”, mientras que el argumento para asignar a C3 el valor de 0.9 fue: “este

criterio tiene un nivel de importancia igual al de la seguridad, pues se busca que la cantidad de operarios para el manejo de la máquina sea la mínima”. Otro diseñador podría haber asignado valores totalmente diferentes y tendría sus argumentos para ello, igualmente subjetivos, aún cuando el diseñador tenga amplios conocimientos y mucha experiencia acumulada. Lo mismo sucede para asignar los valores de A1, A2 y A3 en el cuadro 5. De cualquier manera, los métodos de evaluación y selección de la alternativa de solución permiten desglosar las posibles soluciones en un conjunto de parámetros cotidianos para el ingeniero, como los criterios de diseño. Lo importante es que se evalúan las alternativas de manera cuantitativa, aunque subjetiva.

VI.7. Diseño preliminar

Una vez que una alternativa de solución ha sido seleccionada de alguna manera, se precede a plasmar esa idea en bosquejos generales de la misma. En esta etapa se realizan dibujos “a mano alzada”, mostrando las partes por separado y al artefacto en su conjunto, en su configuración total. Con esto se busca básicamente ubicar o plantear las relaciones funcionales entre las diferentes partes que conforman el artefacto solución. En estos dibujos preliminares se anotan, de ser necesario, algunas observaciones globales y notas importantes que expliquen cómo funcionaría el diseño propuesto. Por ejemplo, la figura 27 muestra el esquema de una propuesta de solución para el desarrollo de un aparato doméstico para desalar agua salobre o de mar.

El bosquejo o croquis ilustra de manera muy general la funcionalidad mínima del dispositivo, es decir, la manera en que purificaría el agua en caso de ser construido. En este ejemplo, mientras el eje gira, los discos fijados a él recogen agua salada del tanque, la cual forma una delgada capa en la superficie de los discos. Con el giro de los discos, esta capa de agua se evapora por la acción del aire que choca contra los discos. Unas placas intercaladas entre los discos, las cuales contienen un refrigerante hacen que el vapor de agua se condense en ellas. El agua condensada en forma de gotas, fluye hacia una canaleta colectora. Esta agua de la canaleta ya es potable.

Como lo indica Krick en este ejemplo, la concepción de este dispositivo para resolver el problema planteado (definido como: encontrar un medio para transformar grandes cantidades de agua salada en agua potable, a un costo razonable para un número importante de compradores en potencia) implica,

además de la creatividad del diseñador, la recurrencia a un acervo de conocimientos tanto científicos como técnicos. Krick¹⁴⁰ lo plantea de la siguiente manera:

No pudo [el diseñador] haber desarrollado tal máquina sin entender los fenómenos de evaporación y condensación, el comportamiento de delgadas capas o películas de líquido, los procesos térmicos, y otros hechos científicos. Sin embargo, estos conocimientos [científicos] por sí solos no hubieran bastado para producir el aparato creado. La idea de los discos rotatorios intercalados entre placas condensadoras estacionarias, la configuración particular de éstas y otras características únicas del mecanismo, son producto del proceso llamado *invención*.

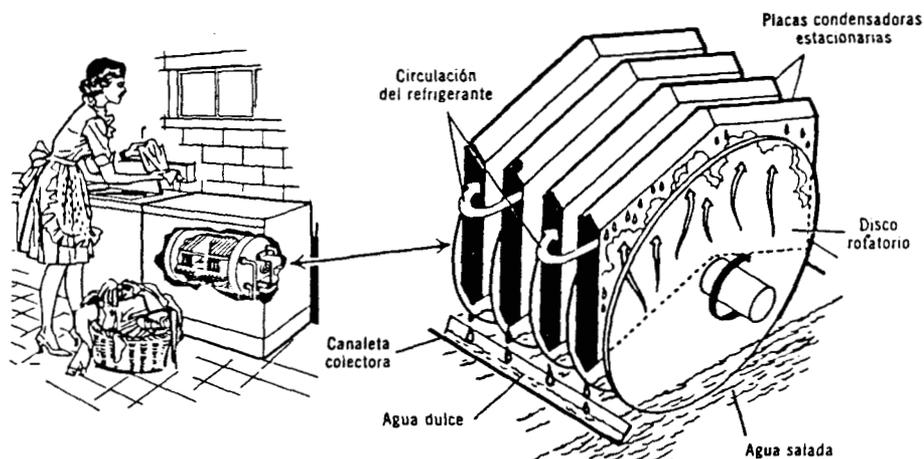


Figura 27. Fuente: Krick, Edward V., *Introducción a la ingeniería y al diseño en la ingeniería*, pág. 18.

No se examinará el concepto de invención, el cual es complejo y no suficientemente aclarado por especialistas como psicólogos y sociólogos. Baste con decir que por invención se entiende el proceso de generar las alternativas de solución al problema planteado, y es en gran medida subjetivo. Sin embargo, como lo plantea Krick y muchos más, se considera en general que la calidad de las soluciones planteadas está relacionada con el conocimiento científico y práctico que posee el inventor. En el ejemplo anterior están involucrados conocimientos de ciencias teóricas como la física y la química, y de ciencias aplicadas como la mecánica de fluidos, ciencia de materiales y la termodinámica técnica.

Este tipo de croquis, que muestran la funcionalidad mínima y características muy generales de la solución propuesta, constituyen lo que se denomina como diseño preliminar, porque están sujetos a un proceso de refinación y detallado posterior más riguroso.

Sobre los bosquejos se lleva a cabo una primera evaluación de su probable viabilidad. Esto se lleva a cabo idealizando el artefacto propuesto; es decir, transformando el objeto real en un modelo del mismo, o en un conjunto de modelos de sus partes importantes. Con los modelos de la alternativa de solución seleccionada se busca probar de alguna manera que la solución planteada es factible de ser llevada a la

práctica exitosamente, aunque la seguridad plena de ello es todavía incierta. Es decir, una vez que ha sido seleccionada una idea para la solución, tiene que ser analizada a la luz de los conocimientos disponibles. Para este análisis se construye un modelo, sea matemático o experimental, o una combinación de ambos, dependiendo de la complejidad de la alternativa de solución que se esté explorando. Pero cualquiera que sea el modelo, deberá ser lo suficientemente sencillo para poderlo elaborar en un tiempo razonable, y lo suficientemente complejo para que proporcione resultados significativos.¹⁴¹ Como se apreciará, el análisis a través del modelo correspondiente requiere la aplicación de principios físicos (de la ciencia o de la técnica) a este modelo, así como la obtención de resultados numéricos.

En caso de prosperar la alternativa seleccionada, estos mismos principios son la base sobre la cual se fundamenta el funcionamiento del artefacto desarrollado. La explicación de los principios de funcionamiento y de las características relevantes de un artefacto desarrollado, es una actividad sumamente importante en la ingeniería moderna, jugando un papel destacado en la comunicación entre la comunidad ingenieril.

Se construye el modelo para probar en primera instancia la funcionalidad de la opción seleccionada, como una primera aproximación pero no a ciegas, sin establecer todavía las características cuantitativas definitivas, tales como dimensiones, formas, pesos, arreglos entre partes, etc. En cualquier caso, el objetivo del modelo es obtener de alguna manera un conjunto de datos, números, que permitan estimar de manera cuantitativa la pertinencia de la alternativa. Además, el modelo desarrollado, de cualquier manera debe ser sustentado en base al mayor conocimiento científico posible, puesto que ello asegura predicciones confiables acerca del comportamiento que tendría el artefacto si fuere construido.

Esta etapa es el punto de atención más importante del proceso de diseño para los propósitos de este análisis, puesto que es la fase del diseño en la cual se manifiesta con mayor énfasis la recurrencia al conocimiento científico para asistir la solución de los problemas prácticos en la ingeniería.

VI.7.1. Modelo matemático

El modelo matemático es una herramienta conceptual para investigar más científicamente posible, a la alternativa de solución, para evaluar su viabilidad. Este estudio sin embargo, no se remite tanto al

planteamiento de las causas originales de los procesos o eventos naturales involucrados de alguna manera en la alternativa de solución que se explora. Más bien, esta investigación se orienta en la forma como lo describe Baird:¹⁴²

Normalmente, la primera fase de la investigación sobre un fenómeno nunca antes estudiado consiste en una búsqueda de variables que parecen estar relacionadas. Mediante la identificación de estas variables significativas, reducimos el campo de investigación a niveles prácticos y facilitamos el trabajo sistemático tanto a nivel experimental como teórico.

La investigación en ingeniería se orienta alrededor de estas variables significativas y no alrededor de las causas originales, pues no es la explicación en sí misma la que se busca. Las variables significativas contienen lo esencial del objeto de estudio, y están vinculadas principalmente con los parámetros que definen los estados A y B del problema de diseño y con los parámetros que determinan el comportamiento del conjunto de fenómenos naturales que, al menos en principio, parecen determinar el comportamiento del artefacto hacia el cual está orientada la alternativa de solución que se explora. Por ejemplo, para el caso del dispositivo desalador de agua ilustrado en la figura 27, las variables significativas involucrarían aspectos tales como la velocidad de rotación del eje, el número y diámetro de los discos, la distancia entre discos y placas intermedias, el grosor de la película de agua en los discos, la concentración de sal en el agua y la densidad de ésta.

La matematización de los procedimientos de diseño en la ingeniería moderna es uno de los rasgos distintivos de la tecnología en relación con la técnica tradicional. De ello depende en gran medida la precisión alcanzada por los artefactos modernos y la elevación de los estándares de funcionalidad. Todo cálculo de ingeniería, como lo señala Feodósiev¹⁴³ implica un proceso que se lleva a cabo en tres etapas:

- a) Idealización del objeto de estudio
- b) Análisis del diagrama de cálculo
- c) Vuelta del diagrama de cálculo a la construcción real

La idealización del objeto de estudio se refiere precisamente a la elaboración de un modelo matemático, al que Feodósiev denomina diagrama de cálculo. Una vez desarrollado el modelo, se evalúa su comportamiento en base al conocimiento –de las ciencias de la ingeniería principalmente– que está implicado en la concepción del modelo, lo cual corresponde a la etapa b). La etapa c) consiste en construir un artefacto físico en base a los resultados obtenidos en las etapas a) y b). Las etapas a) y b) corresponden a la fase del proceso de diseño que se expone en el presente apartado, mientras que la

etapa c) corresponde a la construcción de un prototipo y se analiza en la siguiente sección (fase 7 del proceso de diseño).

Una definición muy simplificada de lo que constituye un modelo, y que es muy común en los textos de ingeniería, es el que Dixon¹⁴⁴ presenta como: “una aproximación idealizada de una situación real”. Esta definición da una idea muy general acerca de lo que es un modelo, del cual el modelo matemático es un caso particular. Para los propósitos de este análisis se requiere una definición un poco más detallada. Es de utilidad en este sentido la acotación que presenta Baird (a quien no se pretende adjudicar el origen de tal distinción)¹⁴⁵, recordándonos que:

Por una parte, tenemos el mundo real y nuestras percepciones de él; por la otra, las construcciones hipotéticas, imaginarias, creadas a partir de conjuntos de definiciones. Una construcción de éstas se denomina a menudo modelo de la situación, y el uso de los modelos es casi universal en nuestro pensamiento, sea éste científico o no.

Bajo estas consideraciones, se entiende por modelo a un conjunto de construcciones hipotéticas, creadas a partir de algunas definiciones, que representan una simplificación de una parte del mundo real de interés. La simplificación se lleva a cabo a través de un proceso de idealización, que consiste en identificar y destacar las particularidades más esenciales para el problema considerado acerca de la parte del mundo real de interés. A tales particularidades esenciales de interés se les denomina variables significativas. Por ejemplo, para diseñar el tamaño y forma geométrica adecuados de una pieza de máquina sometida a un cierto conjunto de fuerzas que surgirán durante su funcionamiento cotidiano, en la resistencia de materiales se elaboran modelos de las piezas en donde destacan algunas variables significativas como ciertas dimensiones, la forma en que las piezas se unen a otras, el tipo de fuerzas que actúan sobre ellas, y algunas propiedades de los materiales como la capacidad de resistir deformaciones y la rotura bajo el efecto de las fuerzas.

A través de la idealización se ignoran todos los factores que no pueden influir de un modo sensible sobre la esencia del fenómeno considerado. Esta simplificación es inevitable, puesto que un análisis que tenga en cuenta a todas las propiedades y particularidades del objeto real es imposible en principio, dada la cantidad y variedad de ellas, como Feodósiev lo indica. De esta manera, sería imposible tener en cuenta variables como la disposición de todos los átomos en los cristales de los metales a partir de los cuales se construyen las piezas, así como algunos defectos que surgen durante la elaboración de los materiales y de las piezas de las máquinas.

El modelo describe la naturaleza o comportamiento del objeto real al cual es referido. Esta descripción se puede efectuar mediante palabras, números, símbolos, esquemas, gráficas y diagramas, etc., o bien

pareciéndose al objeto representado o comportándose como él.¹⁴⁶ En este sentido, una imagen de una persona o cualquier objeto es un modelo, que una descripción verbal de un acontecimiento o de un objeto como una silla, una máquina para sembrar maíz o del proceso mismo de la siembra de maíz. De igual manera, una teoría, como la de Darwin acerca de la evolución biológica, o de Newton sobre la naturaleza corpuscular de la materia, al igual que una fórmula química, son todos ejemplos de modelos.

El grado en el cual el modelo y el objeto representado por él coinciden en comportamiento, se le denomina grado de correspondencia entre ellos. Mientras más fiel sea la descripción alcanzada por el modelo acerca del objeto representada, mayor se dice que es el grado de correspondencia entre ambos y viceversa. Ciertamente, el concepto de modelo que ha sido presentado no corresponde al tipo de modelos que se requieren y se utilizan como base para el cálculo de las obras de ingeniería, dado que, por su generalidad, no alcanza el grado de correspondencia requerido para llevar a cabo cálculos de precisión. Por ejemplo, la simple descripción verbal de la forma en que un tractor agrícola funciona, no es suficiente para comprender la complejidad de su conformación detallada al grado de ser suficiente para construir un ejemplar, puesto que en la construcción están involucrados cálculos numéricos que son casi imposible, o imposibles en forma práctica, de ser deducidos o inferidos a partir de una descripción verbal. Se requiere algún tipo de modelo que, además de la expresión oral, incluya símbolos, esquemas, números, conceptos, hipótesis, etc. Estos son los modelos matemáticos, un tipo particular de modelos, especiales porque involucran procesos de cuantificación basados en conocimientos científicos, sobre todo de las ciencias de la ingeniería, aunque no exclusivamente.

Un modelo es matemático cuando las particularidades más esenciales del objeto de interés se expresan en términos matemáticos, es decir, mediante ecuaciones o sistemas de ecuaciones matemáticas. Así, las variables significativas pasan a ser variables matemáticas dentro de modelos que van, “desde simples relaciones algebraicas hasta grandes y complicados sistemas de ecuaciones diferenciales”.¹⁴⁷

Para la investigación científica del objeto real, éste se sustituye por el modelo matemático correspondiente. Es importante destacar las ventajas del modelo matemático con respecto a la mera descripción verbal, pues esto es relevante para el tipo de situaciones que se presentan en la ingeniería.

Tijonov¹⁴⁸ lo señala de esta manera:

Gracias a la sustitución de un objeto real por el modelo [matemático] correspondiente, aparece la posibilidad de formular su estudio como un problema matemático universal, que no depende de la naturaleza concreta del objeto. Las matemáticas permiten describir uniformemente un amplio círculo de hechos y observaciones, realizar su análisis cuantitativo detallado, predecir cómo se comportará el objeto en diferentes condiciones, es decir, pronosticar los resultados de futuras observaciones.

La estructuración del modelo matemático está vinculada necesariamente con el conocimiento científico, por ello en esta etapa del proceso de diseño es evidente la incorporación de la ciencia a la técnica, del conocimiento de las ciencias puras y aplicadas al conocimiento técnico, práctico. Feodósiev¹⁴⁹ indica en este sentido que “se entiende que al elegir el diagrama de cálculo [modelo matemático], nos orientamos ya por las posibilidades que nos brindan las teorías existentes [científicas].” Es decir, la elección o el mero planteamiento de un modelo matemático está ya orientada por el conocimiento científico disponible o conocido por quienes llevan a cabo este proceso de abstracción. Al mismo tiempo, el modelo matemático, una vez elaborado, determina de manera irreversible que se deba utilizar conocimiento científico para su posterior utilización en el problema correspondiente. Dixon¹⁵⁰ lo expone de la siguiente manera:

Tan pronto como el modelo analítico [modelo matemático] ha quedado estructurado puede hacerse uso de la ciencia y los conocimientos del dominio de la ingeniería. Se puede aplicar el modelo, según sea el caso, la primera ley de Newton o las ecuaciones de la cantidad de movimiento, o cualquier otro principio adecuado.

El modelo matemático, utilizado tanto en las ciencias puras como en los problemas de la ingeniería, para el estudio tanto de fenómenos naturaleza como de artefactos, se ha convertido en un requisito para resolver los problemas prácticos del diseño dentro del rigor científico.

Un ejemplo proveniente de las ciencias puras, en el ámbito de la física (mecánica teórica) es el del análisis de la caída libre de un cuerpo material. En este caso, el modelo matemático reduce el evento a un esquema como el de la figura 28, donde el cuerpo material en caída libre tienen una masa m y está sujeto a dos fuerzas F_G y F_V , las cuales tienen como efecto el movimiento de caída libre a una aceleración a . La fuerza F_G representa la fuerza de gravedad, hacia arriba (suponemos “abajo” hacia el centro de la Tierra).

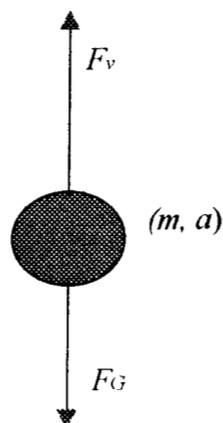


Figura 28

Las variables significativas son las fuerzas, la masa y la aceleración del cuerpo, el cual ha sido idealizado, puesto que se supone que otras variables como el color, la composición química o la forma no influyen significativamente en el problema de interés. Se supone también que la masa es constante durante la caída y otras cosas más.

Al esquema anterior hay que aplicar ahora algunas leyes o principios científicos conocidos. En este caso puede aplicarse la segunda ley de Newton, cuya expresión matemática está dada por:

$$F = ma \quad (6)$$

Esta ecuación afirma que, dado un cuerpo material de masa m , adquirirá una aceleración a si es sometido a una fuerza resultante F . La fuerza resultante F es la suma de todas las fuerzas individuales que actúan sobre el cuerpo. Con la ecuación (6) y el esquema de la figura 28, el modelo matemático está listo para iniciar el análisis del fenómeno de caída libre. Este modelo, como cualquier modelo matemático, describe un suceso (natural en este caso) en términos matemáticos. Es una idealización de la realidad y conduce a resultados predecibles, ya que si se conocen dos variables de la ecuación (6), la tercera se calcula simplemente aplicando la ecuación.

La aplicación de la ecuación (6) al esquema de la figura 28, es decir, para el caso particular de caída libre, toma la forma de una ecuación diferencial, es decir:

$$m \frac{dv}{dt} = F \quad (7)$$

donde:

$$\frac{dv}{dt} = a$$

dado que la aceleración a puede expresarse como la primera derivada de la velocidad del cuerpo con respecto al tiempo. Nótese cómo ahora aparecen otras dos variables significativas: la velocidad v y el tiempo t . Esto es común a medida que el modelo se va detallando.

Por otro lado, la fuerza resultante F es la suma de la fuerza de gravedad F_G y la fuerza de resistencia del aire F_V , es decir:

$$F = F_G + F_V \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7) se tiene que:

$$m \frac{dv}{dt} = F_G - F_V \quad (9)$$

A su vez, la fuerza de gravedad está dada por la ecuación:

$$F_G = mg \quad (10)$$

donde g es la aceleración debida a la gravedad, y es una constante conocida¹⁵¹. La fuerza de resistencia del aire F_V , simplificada a su vez, puede expresarse como:

$$F_V = -Kv \quad (11)$$

donde v es la velocidad del cuerpo y K se denomina coeficiente de arrastre, y es una constante que se obtiene de manera experimental para diversas condiciones.

Si se sustituyen las ecuaciones (10) y (11) en la ecuación (9), se obtiene la ecuación que se buscaba para estudiar el movimiento en caída libre, es decir:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - Kv$$

la cual, dividida entre m en ambos lados, toma la siguiente forma:

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{k}{m}v \quad (12)$$

La ecuación (12), al resolverse para condiciones particulares, permite entender y predecir las particularidades del movimiento de caída libre a un nivel aceptable. Por ejemplo, si el cuerpo indica su caída desde el reposo, o sea, $v=0$ cuando $t=0$, entonces puede utilizarse la teoría de las ecuaciones diferenciales para encontrar la siguiente solución:

$$v = \frac{gm}{k} \left[1 - e^{-\frac{kt}{m}} \right] \quad (13)$$

La ecuación (13) permite calcular, con cierto grado de precisión (o de error) la velocidad del cuerpo y su coeficiente de arrastre k . El resultado se expresa en números, y puede ser verificado en la práctica para evaluar el grado de correspondencia del modelo.

Regresando al proceso de diseño, veamos ahora cómo el modelo matemático se relaciona con una primera aproximación al análisis de la alternativa de solución seleccionada, es decir, veamos cómo se trabajan los modelos matemáticos para evaluar el funcionamiento de artefactos, y en qué manera esto se relaciona con la aplicación del conocimiento científico para la solución de problemas prácticos en la ingeniería.

Existe en las ciencias de la ingeniería una gran cantidad de modelos matemáticos que, habiendo sido desarrollados inicialmente para resolver un problema particular, hoy se utilizan para una variedad de problemas. Considérese por ejemplo, el problema de determinar la trayectoria y el alcance de un proyectil lanzado con una velocidad inicial U_0 y un ángulo θ , como lo ilustra la figura 29(a).

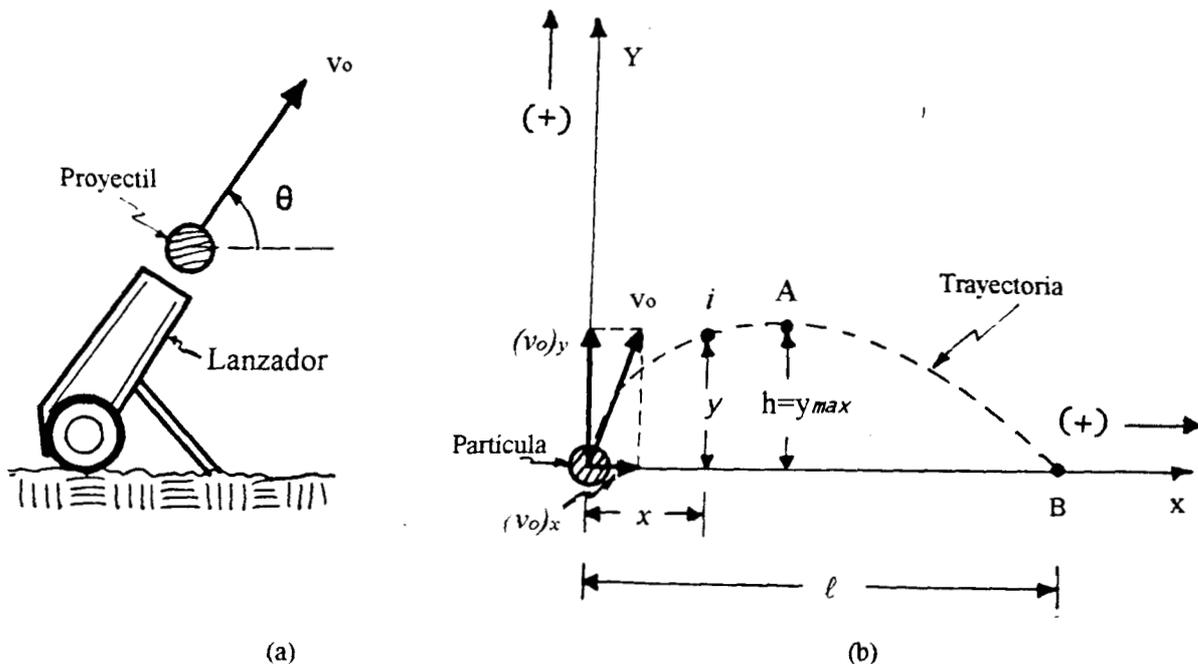


Figura 29

Al parecer, este problema fue planteado y resuelto inicialmente para determinar las mejores condiciones para lanzar piezas de artillería, aunque, como se mostrará, el modelo matemático elaborado para resolver este problema tiene hoy muchas aplicaciones muy diferentes. El modelo matemático que resuelve este problema se inicia idealizando la situación, para lo cual se plantean los siguientes supuestos:

- 1). – La Tierra es un sistema inercial de referencia, es decir, un cuerpo no acelerado con respecto al cual se puede describir el movimiento del proyectil.
- 2). – La aceleración de la gravedad terrestre g es constante.
- 3). – Se puede despreciar la curva de la Tierra, es decir, que ésta es plana.
- 4). – Se puede despreciar la influencia que ejerce el aire como resistencia al movimiento.

En realidad hay muchos supuestos más, pero se mencionan los más comunes. Es difícil, quizás imposible, determinar realmente cuántos supuestos más están implícitos en los modelos matemáticos elaborados. En el esquema de la figura 29(b) ya no aparece el proyectil con su forma real, ni el dispositivo lanzador, sino un conjunto de símbolos, que incluyen una partícula como idealización del proyectil y un conjunto de parámetros que son las variables significativas del modelo: la velocidad de lanzamiento v_0 , el ángulo de lanzamiento θ , la distancia ℓ de alcance que recorrerá la partícula hasta tocar el suelo en el punto B , y la altura h máxima que alcanzará en algún punto A . En la ciencia de la mecánica teórica se considera que una porción de materia es una partícula cuando sus dimensiones no tienen consecuencias en el análisis del problema físico,¹⁵² lo cual, para el proyectil queda suficientemente descrito por el movimiento de su centro de masa. Se considera también que cualquier giro que experimente el objeto sobre sí mismo durante el evento no tiene consecuencias apreciables para la precisión que se busca alcanzar.

Una vez que se ubica el lanzamiento del proyectil en el origen del sistema de coordenadas rectangulares XY , como se muestra en la figura 29(b), se aplican algunas de las ecuaciones de la cinemática de la partícula, que son parte de la mecánica teórica. Las ecuaciones básicas para este caso son las siguientes:

$$V = \frac{ds}{dt} \quad (14)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (15)$$

donde s es el desplazamiento o distancia recorrida y t es el tiempo transcurrido. Si la aceleración a es constante, entonces pueden realizarse las siguientes manipulaciones en las ecuaciones (14) y (15). De la ecuación (15):

$$dv = a dt$$

esta ecuación puede integrarse de la siguiente manera:

$$\int_{v_0}^v dv = a \int_0^t dt$$

de donde se obtiene:

$$v = v_0 + at \quad (16)$$

Las ecuaciones (14) y (16) se pueden igualar, es decir:

$$v = \frac{ds}{dt} = v_0 + at$$

de donde se obtiene:

$$ds(v_0 + at) dt$$

la cual también puede integrarse de la siguiente manera:

$$\int_{s_0}^s ds = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

de donde se obtiene la ecuación:

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (17)$$

La ecuación (17), aplicada al esquema idealizado de la figura 29(b) completa el modelo matemático para el problema de la trayectoria del proyectil. En esta ecuación, s indica la distancia recorrida por la partícula durante un lapso de tiempo t sometida a una aceleración constante a , mientras que v_0 y s_0 representan la velocidad y la distancia respectivamente, en un instante anterior considerando como inicial. Este modelo permite plantear entonces que, en cualquier instante, se pueden calcular las distancias horizontal “x” y vertical “y” de la partícula, como se aprecia en la figura 29(b). Estas distancias se calculan aplicando dos veces la ecuación (17), una para la dirección horizontal y otra para la vertical.

Para la dirección horizontal, la ecuación (17) queda como:

$$x = x_0 + (v_0)_x t + \frac{1}{2} at^2 \quad (18)$$

pero:

$$x_0 = 0,$$

$$(v_0)_x = v_0 \cos \theta.$$

Además, $a = 0$, dado que la única aceleración existente es la de la gravedad g , pero ésta tiene dirección vertical hacia abajo, por lo cual en la dirección horizontal no hay ninguna aceleración. Bajo estas consideraciones, la ecuación (18) queda como:

$$x = v_0 t \cos \theta \quad (19)$$

Para la dirección vertical, la ecuación (17) queda de la siguiente manera:

$$y = y_0 + (v_0)_y t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (20)$$

donde:

$$y_0 = 0,$$

$$(v_0)_y = v_0 \sin \theta$$

$$a = -g$$

(la aceleración de la gravedad tiene signo “-“ porque se dirige hacia abajo). Con estas particularidades, la ecuación (20) queda como:

$$y = v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2 \quad (21)$$

Las ecuaciones (19) y (21) son suficientes para describir la trayectoria de la partícula y calcular los desplazamientos horizontal y vertical. Para establecer la forma exacta de la trayectoria en el modelo, se obtiene, de la ecuación (19):

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \theta}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (21), esta última queda como:

$$y = x \tan \theta - x^2 \left(\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} \right) \quad (22)$$

De la geometría analítica se sabe que la ecuación (22) es la ecuación de una curva llamada parábola, siendo ésta la forma de la trayectoria del proyectil. Se puede demostrar, aplicando el cálculo diferencial a la ecuación (22), que la altura máxima h está dada por:

$$h = y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g} \quad (23)$$

El alcance o distancia recorrida horizontal ℓ se obtiene haciendo $y=0$ en la ecuación (22), de donde se obtiene que:

$$\ell = \frac{v_o^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{g} \quad (24)$$

Para calcular el máximo alcance posible ℓ_{\max} a partir de la ecuación (24), donde v_o y g son constantes, basta con apreciar que $\ell = \ell_{\max}$ cuando $\operatorname{sen}2\theta$ alcance el máximo valor posible. De la trigonometría se sabe que el máximo valor de $\operatorname{sen}2\theta$ está dado por:

$$(\operatorname{sen}2\theta)_{\max} = 1$$

lo cual ocurre cuando $2\theta = 90^\circ$; es decir, $\theta = 45^\circ$. Esto significa que:

$$\ell_{\max} = \frac{v_o^2}{g} \quad (25)$$

y $\ell = \ell_{\max}$ cuando el ángulo de lanzamiento θ es igual a 45° , independientemente del valor de su velocidad de lanzamiento v_o . Cualquier lanzamiento del proyectil a un ángulo distinto de 45° dará un alcance menor a ℓ_{\max} .

El modelo matemático para el análisis de la trayectoria de un proyectil se utiliza en la ingeniería, junto con otras consideraciones adicionales, para resolver problemas prácticos muy diversos. Sirve por ejemplo, para orientar un dispositivo de riego agrícola como el de la figura 30, donde el ángulo de lanzamiento del chorro de agua debe garantizar el alcance máximo para distribuir el agua a la mayor distancia posible. También en algunos tipos de sembradoras, las cuales arrojan la semilla en todas direcciones mientras el tractor al cual están montadas avanza, se utiliza este modelo para calcular la distancia a la que habrá de distribuirse la semilla, sobre todo para forrajes.

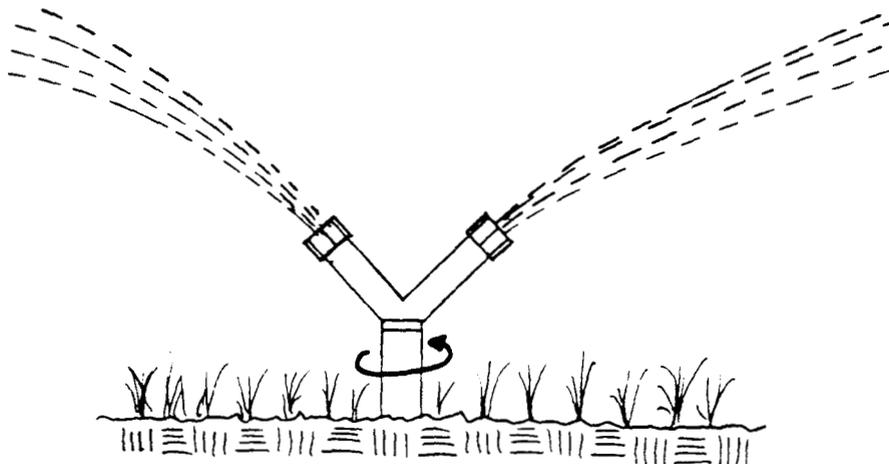


Figura 30

En la realidad, la trayectoria del proyectil no es exactamente una parábola, puesto que la resistencia del aire a veces es considerable. Mientras mayor sea la velocidad de lanzamiento v_0 , mayor es la resistencia del aire, y existen datos experimentales para incluir esta consideración cuando fuese necesario. Y la aceleración de la gravedad no es constante, ni la superficie de la Tierra es plana, etc. Pero la precisión del modelo es la suficiente para muchos casos, o bien el modelo se afina experimentalmente en la siguiente fase de construcción de un prototipo. En cualquier caso, el grado de correspondencia entre el modelo y el objeto real tiene que ser el suficiente como para servir al menos de guía en situaciones complejas, y debe notarse que con el modelo matemático como herramienta, el problema del diseño en la ingeniería ya no está guiado por el simple ensayo y error, sino que es guiado por el conocimiento científico disponible. Y el modelo matemático es una herramienta muy importante para guiar los procesos de optimización, es decir, para buscar soluciones óptimas a los problemas, lo cual significa automáticamente elevados niveles de funcionalidad, como lo muestran las ecuaciones (23) y (25) del ejemplo.

Regresando al proceso de diseño, en esta etapa se formula un modelo matemático para evaluar numéricamente la posibilidad de que la alternativa de solución seleccionada pueda llevarse a la práctica. Por ejemplo, en un problema de diseño que consistía en hallar la forma de separar los jitomates verdes de los maduros, se decidió que una posible alternativa de solución sería utilizar agua para separarlos por diferencia de densidades.¹⁵³ Al respecto, una prueba experimental muy simple mostró que los jitomates verdes flotaban, mientras que los maduros se hundían. El problema sería resuelto mediante el diseño de un dispositivo que utilizaría este resultado. Para tal propósito fue necesario calcular el tiempo que dura un jitomate verde en salir hasta la superficie del agua en un tanque, una vez que fuese soltado, desde el reposo, a una profundidad de 60 centímetros. Tal situación se muestra en la figura 31.

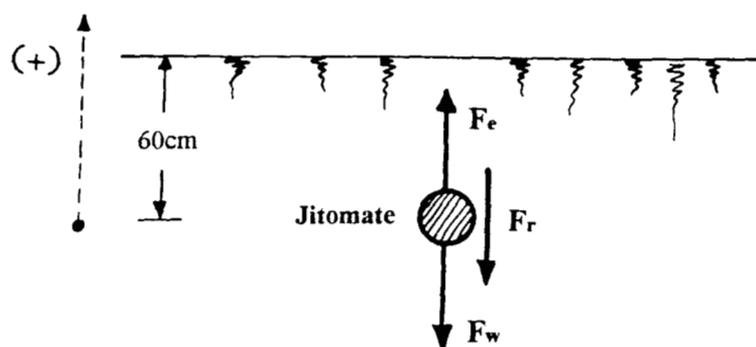


Figura 31. Fuerzas que actúan sobre el jitomate sumergido en agua.

Para evaluar el tiempo de salida a flote, se tomó un jitomate muestra, verde, de 134 gramos de peso y volumen de 142 cm³. El problema se definió exactamente de la siguiente manera:

Dado un tomate [jitomate] que pesa 134 gramos, tiene un volumen de 142 cm³ y se suelta a una profundidad de 60 centímetros dentro de un tanque de agua, ¿cuánto tiempo requiere para llegar a la superficie?

A continuación se idealizó el problema. El jitomate se supuso que era completamente esférico, aunque en la realidad la forma del jitomate no es exactamente así. Sobre esta esfera se aplican solamente tres fuerzas: la fuerza de empuje del agua F_e hacia arriba, la fuerza de resistencia por la fricción del agua F_r hacia abajo y la fuerza del peso del jitomate F_w hacia abajo, como se muestra en la figura 31. A continuación se le aplicó a este esquema la segunda ley de Newton, es decir:

$$F = ma \quad (26)$$

Donde F es la suma de las fuerzas F_e , F_r y F_w . La masa del jitomate es m y su aceleración está representada por a . De esta manera, la ecuación (26) toma la forma:

$$F_e - F_w - F_r = ma \quad (27)$$

La fuerza de empuje F_e del agua equivale a:

$$F_e = \delta_a g V \quad (28)$$

donde: δ_a = densidad del agua
 g = aceleración de la gravedad
 V = volumen del jitomate

La fuerza de resistencia del agua F_r tiene la siguiente forma:

$$F_r = C_D \delta_a \frac{v^2}{2} A \quad (29)$$

donde: C_D = coeficiente de arrastre del líquido
 v = velocidad del jitomate
 A = área de la sección transversal del jitomate

El peso del jitomate F_w está dado por:

$$F_w = mg = \delta_j g V \quad (30)$$

donde δ_j = densidad del jitomate

La masa m del jitomate equivale a:

$$m = \delta_j V \quad (31)$$

Sustituyendo las ecuaciones (28), (29), (30) y (31) en la ecuación (27), se llega a:

$$\delta_a gV - \delta_j gV - C_D \frac{\delta_a v^2 A}{2} = \delta_j Va \quad (32)$$

Esta ecuación puede reacomodarse de la forma:

$$a = \left[\frac{\delta_a}{\delta_j} - 1 \right] g - \frac{3}{4} C_D \frac{\delta_a}{\delta_j D} v^2 \quad (33)$$

Pero la aceleración a equivale a:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (34)$$

Por lo tanto, se tiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dv}{dt} = \left[\frac{\delta_a}{\delta_j} - 1 \right] g - \frac{3}{4} C_D \frac{\delta_a}{\delta_j D} v^2 \quad (35)$$

El modelo matemático está ahora completo, puesto que en la ecuación (35) está implícita la distancia y que el tomate recorre según la ecuación (34). Se tienen los siguientes datos:

$$\delta_a = 1000 \text{ g/cm}^3$$

$$\delta_j = 961.2 \text{ g/cm}^3$$

$$D = 6.46 \text{ cm}$$

$$g = 9.81 \text{ cm/s}^2$$

y donde δ_a y δ_j se obtuvieron aplicando la ecuación (31) a los casos del agua y jitomate, respectivamente. El diámetro D se obtuvo del volumen V de la esfera. Aplicando estos datos a la ecuación (35) se obtiene finalmente:

$$\frac{dv}{dt} = 0.39 - 12.07 C_D v^2 \quad (36)$$

Al resolver esta ecuación se obtuvo que, transcurridos 2.72 segundos, y a una velocidad de 0.265 metros por segundo, el jitomate habrá recorrido una distancia de 0.6 m hasta la superficie del tanque. Este resultado resultó ser muy aproximado al real, aunque no exacto, dado que el jitomate no es una esfera perfecta. El modelo permitió conocer las relaciones entre la distancia recorrida, la velocidad de flotación, las densidades del líquido (agua) y del jitomate, y la forma de este último (C_D está en función de la forma). De esta manera, el dispositivo puede diseñarse tomando en cuenta todos estos parámetros y las ecuaciones (35) y (36) como guías, aunque después en la práctica, el dispositivo deberá refinarse.

Las ciencias de la ingeniería están llenas de modelos matemáticos para la solución de problemas prácticos. Ejemplos de ellos son los diagramas de cuerpo libre en la mecánica, los elementos estructurales como barras y bóvedas en la resistencia de materiales, los circuitos eléctricos en la electrotecnia, los esquemas cinemáticos y cinéticos en la teoría de máquinas y mecanismos, los ciclos termodinámicos en la termodinámica, los circuitos hidráulicos en la hidráulica, y los modelos ya elaborados para elementos de máquinas como las máquinas simples, los tornillos, los cojinetes, los resortes, los frenos, los embragues, las flechas y ejes, los engranajes, las levas etc. Debido a esto, una de las prioridades en la formación profesional de los modernos ingenieros, es precisamente prepararlos para que desarrollen la capacidad de pensar en los fenómenos físicos en términos de abstracciones útiles, es decir de modelos matemáticos.

Además de utilizarse para hacer predicciones con la confiabilidad que las teorías científicas permiten, los modelos matemáticos se utilizan en la ingeniería porque permiten simplificar y con ello entender fenómenos y artefactos complejos, que de otra manera serían muy difíciles de asimilar. También se ahorran costos en el diseño, porque disminuyen en gran medida los procesos de simple ensayo y error empíricos como guía, los cuales requieren de la destrucción de grandes cantidades de artefactos y sus piezas componentes.

La ciencia guía hoy en gran medida la solución de problemas prácticos en la ingeniería. El uso de modelos matemáticos ilustra claramente cómo el conocimiento científico es fundamental en la tecnología moderna, la cual por lo mismo es a menudo llamada técnica científica. Por ello es común que, dentro del ámbito de la ingeniería, se manifiesten opiniones como la siguiente:

Aparentemente puede considerarse que la ingeniería de diseño es el apogeo del trabajo ingenieril. La persona que trabaje en esta área es de esperarse que esté bien preparada tanto en matemáticas como en ciencias de la ingeniería.¹⁵⁴

Mediante los modelos matemáticos, al matematizar los problemas de la técnica y permitir el uso de principios y teorías científicas en su solución, los modelos matemáticos constituyen la herramienta más importante para alcanzar los elevados niveles de funcionalidad que en general, caracterizan a los artefactos modernos, tal como ha quedado manifiesto en la técnica agrícola a partir de finales del siglo XIX. El ensayo y error puramente empírico, aunque no ha desaparecido como parte de los métodos de la tecnología moderna, ha pasado a ocupar una importancia menor en la ingeniería. Por otro lado, la serie de suposiciones o hipótesis que se hacen en la elaboración de los modelos matemáticos, permiten al ingeniero tener conciencia de los límites dentro de los cuales una solución es viable o factible. En ello hay también una diferencia importante con respecto a la técnica tradicional, en la cual no se tenían

claros los límites de aplicación de determinadas prácticas o suposiciones. Las suposiciones iniciales son producto del conocimiento científico que hoy se tiene acerca de los fenómenos naturales. Por ejemplo, en el caso del cuerpo en caída libre antes expuesto, se sabe que la masa no es constante en un cuerpo acelerado, según la teoría de la relatividad. Pero al mismo tiempo se sabe, con cierta precisión, que para el problema de interés es suficiente; que para las condiciones de la Tierra, basta con aplicar la mecánica newtoniana (situación imperante en la mayoría de los problemas de la ingeniería moderna, salvo algunas áreas muy especiales, tales como la tecnología aeroespacial), porque el supuesto de que la masa es constante no afecta la precisión deseada. Situaciones similares pueden plantearse para el ejemplo del proyectil, así como para cualquier modelo matemático con el suficiente rigor científico. La ciencia está pues incluida en el proceso de diseño en la ingeniería moderna, y la modelación matemática es una de las vías a través de las cuales ciencia y técnica se mezclan hoy en la práctica.

VI.8. Construcción de un prototipo

El criterio final para decidir si un modelo matemático sirve o no, no es de carácter matemático sino empírico. Matemáticamente es muy difícil demostrar que un modelo matemático, para un problema técnico, es mejor o peor que otro, o establecer el grado de correspondencia con el objeto real. Por ello, el modelo matemático es confrontado con el objeto real en la medida de lo posible. El criterio final es pues, la experiencia, al igual que en las ciencias naturales, con las cuales la ingeniería moderna tiene nexos determinantes. Al respecto, Tijonov¹⁵⁵ ha expuesto que:

El criterio fundamental de verdad [para un modelo matemático] es el experimento, la práctica en el sentido más amplio de la palabra. El criterio de la práctica permite comparar diferentes modelos hipotéticos y elegir entre ellos el más simple y que al mismo tiempo reproduzca las propiedades del objeto de estudio dentro de los límites de la precisión requerida.

En el proceso de diseño, este carácter empírico se manifiesta en la construcción de un modelo físico del artefacto propuesto. Este modelo físico se construye a partir del modelo matemático y de la información teórica obtenida del mismo. Porque en la ingeniería se asume, como lo ha expuesto Norton,¹⁵⁶ que:

No se puede estar seguro de la conexión o viabilidad de un diseño hasta que sea construido y probado. Esto generalmente necesita de la fabricación o elaboración de un modelo físico *prototipo*. Un modelo matemático, aunque es muy útil, no puede ser una representación tan completa y segura de un sistema físico real, como un modelo físico, debido a la necesidad de efectuar hipótesis simplificadoras.

El prototipo es entonces el modelo físico que se construye para poner a prueba la utilidad del modelo matemático. De hecho, uno de los requisitos esenciales del modelo matemático es que sea verificable en la práctica, en la experiencia observable.¹⁵⁷ Por ello, las variables significativas que se identifican o

definen durante la elaboración del modelo matemático, deben ser medibles de alguna manera, traducibles a números o alguna forma de evaluación cuantitativa. Las variables significativas deben ponerse en función de parámetros físicos medibles con la instrumentación o el equipo de laboratorio disponible, tales como medidas de longitud, peso, volumen, flujo, tiempo, densidad, temperatura, presión, viscosidad, voltaje, etc. Precisamente estas variables significativas se evalúan en la práctica con el prototipo, a la vez que se identifican otras que el modelo matemático no había considerado.

Para poder construir un prototipo es preciso primero calcular todas las partes que lo componen. En base al modelo matemático y a los fundamentos disponibles de las ciencias de la ingeniería, se establecen las dimensiones, formas, materiales y demás especificaciones necesarias en todo el detalle que sea posible para el mayor número posible de las partes del artefacto (prototipo), así como las especificaciones sobre el ensamblaje. Las especificaciones deben ser tales que contengan toda la información necesaria para ser fabricadas y ensambladas las partes del prototipo.

Para calcular las dimensiones, establecer la forma y demás especificaciones de una pieza de máquina, se recurre a la teoría de ciencias de la ingeniería como la estática, dinámica, resistencia de materiales, ciencia de materiales, diseño de elementos de máquinas y procesos de manufactura. Aunque el caso más común es que no se tengan elementos suficientes para el cálculo detallado y definitivo de todos los componentes. Por ello, el prototipo que se construya con estas especificaciones es tan sólo el primer ejemplar físico del artefacto que se está diseñando y no el ejemplar definitivo, sino el objeto real que será sometido a pruebas experimentales.

Los prototipos pueden ser de varios tipos. Por ejemplo, pueden ser maquetas, modelos a escala o modelos de trabajo en tamaño real. Las maquetas sólo muestran tamaños, formas y relaciones entre componentes. Por ejemplo, en la ingeniería automotriz se fabrican en arcilla modelos de automóviles que muestran la forma del automóvil y las relaciones espaciales entre sus componentes, pero no muestran cómo trabaja o funcionan estas máquinas.

Los modelos a escala se construyen prácticamente con los mismos componentes que tendría el artefacto final, aunque de tamaño menor o mayor al real para diversos propósitos. A diferencia de la maqueta, en este caso se puede probar la funcionalidad y tomar datos del comportamiento de las variables significativas. Por ejemplo, en el diseño de barcos se utilizan modelos físicos a escala de este tipo de máquinas. El tamaño de estos modelos es tan pequeño (comparado con la máquina real), que

pueden colocarse y probarse dentro de un estanque de agua acondicionado para ello. En el estanque se pueden simular tormentas, vientos, remolinos, mareas, etc., y para probar diversos factores del modelo como la forma, los materiales, el gasto de energía, la estabilidad, etc.

El prototipo en tamaño real es el más conveniente para llevar a cabo las pruebas, ya que éstas resultan más cercanas a la realidad que en los tipos de modelos anteriores. Las pruebas que se pueden realizar en un prototipo de tamaño real las describe Norton¹⁵⁸ de la siguiente manera:

Los ensayos del modelo o prototipo pueden variar desde su funcionamiento simple [funcionalidad] y la observación de su operación, hasta conectar un conjunto de instrumentos extenso para medir con precisión desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas, temperaturas y otros parámetros. Puede ser necesario efectuar las pruebas en condiciones ambientales controladas, tales como altas o bajas condiciones de temperatura o humedad.

Los modelos matemáticos, como se ha dicho, se utilizan tanto en la ciencia como en la ingeniería. Sin embargo, el propósito no es el mismo. Para ilustrar esta situación, considérese el tipo de preguntas que se busca contestar cuando se somete a prueba empírica un modelo mediante un prototipo en la ingeniería. Shigley¹⁵⁹ lo plantea así:

En tal punto es cuando se desea observar si el diseño satisface realmente la necesidad o las necesidades. ¿Es confiable? ¿Competirá con éxito contra productos semejantes? ¿Es de fabricación y uso económico? ¿Es fácil de mantener y ajustar? ¿Se obtendrán ganancias por su venta o utilización? ¿Cuán probable es que ocasione un litigio como producto de riesgo? ¿Y es factible de asegurarlo fácilmente y a bajo precio? ¿Es probable que se requieran medios especiales para reemplazar sistemas o partes defectuosas?

Evidentemente, este no es el tipo de preguntas que se busca contestar cuando se hacen observaciones y experimentaciones en las ciencias puras. Sin embargo, se advierte que en la ingeniería, al igual que en la ciencia pura, la experiencia empírica califica en última instancia a las teorías, hipótesis y juicios que se hacen a nivel teórico. En la construcción del prototipo y prueba del mismo se advierte también la incorporación del conocimiento técnico al saber puramente técnico para la solución de los problemas prácticos de la técnica moderna, a través del proceso de diseño.

VI.9. Diseño definitivo y especificación de la solución

El proceso de prueba del prototipo es iterativo. En realidad, prácticamente todas las fases del proceso de diseño son cíclicas: se regresan a la fase anterior cuando no se logran los objetivos parciales de esa fase, o cuando la etapa anterior no ha sido completamente superada. El prototipo, como se aclaró antes, es sometido a una serie de pruebas, en las cuales se detectan sus deficiencias y se retorna a la etapa anterior de modelación matemática, para afinar el modelo y con ello reacomodar el prototipo.

Cuando las pruebas sobre el prototipo demuestran que éste ha alcanzado un grado de funcionamiento dentro de los límites requeridos, el prototipo se acepta como la solución al problema planteado al inicio del proceso de diseño. El diseño definitivo consiste en completar todos los cálculos y especificaciones de todos los componentes del artefacto. Se dibujan todos los planos para comenzar una producción masiva de ser necesario. La especificación de la solución consiste en la realización definitiva de los planos de manufactura y de montaje o ensamble, así como las especificaciones de dimensiones, materiales, formas, capacidades, etc. Se calcula hasta el último tornillo del diseño elegido. Los resultados se plasman en los planos correspondientes. Y para asegurar los niveles de funcionalidad y optimización alcanzados, se someten algunos ejemplares del artefacto final a pruebas de campo; es decir, al funcionamiento bajo condiciones de trabajo completamente reales.

Por otra parte, la presentación del dibujo obedece a un conjunto de reglas que provienen de la tradición técnica acerca de cómo dibujar las piezas máquinas. Estas reglas, en su mayoría, no provienen de ciencia alguna, sino que son parte del conocimiento práctico acumulado en la técnica moderna, y están incluso estandarizadas a nivel mundial; es decir, son aceptadas como normas de dibujo obligatorias para cualquiera que quiera exponer técnicamente un proyecto u obra de ingeniería. Las normas de dibujo, que son un ejemplo de ilustrativo de las reglas técnicas mencionadas en la sección __, establecen entre otras cosas cómo se debe dibujar cada tipo especial de componente (ejes, tornillos, engranes, resortes, etc.), el grosor de las líneas de dibujo y el tipo de línea, cuáles dimensiones deben ser indicadas y de qué manera, el tamaño del papel de dibujo, la forma de indicar el ensamble de las piezas, etc.

VI.10. La optimización en el proceso de diseño

Como se planteó en la sección I.5, la optimización representa el grado máximo posible que se puede alcanzar en los niveles de funcionalidad, y es una tendencia en la ingeniería moderna buscar los niveles óptimos de funcionalidad en los artefactos.

El conjunto de parámetros de los cuales depende la funcionalidad de un artefacto se denominan criterios. Por ejemplo, la funcionalidad de un tractor agrícola depende de criterios como el rendimiento de su motor, facilidad de manejo, mantenimiento y reparación, la variedad de artefactos que puede accionar, la variedad de tipos de terreno en los que puede trabajar, etc. Cada criterio se evalúa por

separado para lograr que, en conjunto, todos los criterios hagan del tractor un artefacto funcional. Mientras más complejo sea el artefacto, mayor cantidad de criterios se requieren para lograr su funcionalidad. Los artefactos más simples a menudo dependen de uno o dos criterios de funcionalidad. Por ejemplo, los componentes individuales más simples de un artefacto, como cables, tornillos, engranes, poleas, resortes, etc., a su vez deben cumplir una función, la cual comúnmente depende de uno o dos criterios de funcionalidad.

Cada criterio de funcionalidad depende de una variable manipulada por el ingeniero. Por ejemplo, el rendimiento de un motor (criterio) depende de la intensidad de inyección de combustible (variable manipulable). Existe un valor de la variable manipulada, también llamada variable independiente, para el cual el criterio es máximo en términos numéricos. Así, hay un valor de la intensidad de inyección de combustible para el cual el rendimiento del motor es máximo. El valor de la variable independiente para el cual el criterio de funcionalidad es máximo, se denomina valor óptimo de la variable manipulada. Al proceso de buscar el valor óptimo de algún criterio de funcionalidad, se le denomina optimización.

En resumen, la capacidad de un artefacto o algún componente del mismo para llevar a cabo la función asignada, depende de uno o más criterios. En cada criterio hay una variable dependiente, que es el propio criterio, y una variable independiente o manipulada, en la cual algún valor, llamado valor óptimo, produce un criterio máximo, que significa el máximo grado posible de funcionalidad.

El concepto de valor óptimo es fundamental en la ingeniería. Se considera que existen siempre una solución óptimo para cada problema y cada característica específica de una solución tiene un valor óptimo.¹⁶⁰ En la ingeniería se aplican procesos de optimización para encontrar soluciones a los problemas prácticos, es decir, a los artefactos, como también a los métodos para llegar a tales soluciones.

Puede ahora advertirse ya que la optimización va más allá de la mera funcionalidad. En el ejemplo del motor, hay una enorme cantidad de valores de intensidad de inyección de combustible para los cuales el motor funciona, pero sólo un valor para el cual el rendimiento del motor es el máximo posible, es decir, sólo hay un valor óptimo de intensidad de inyección de combustible.

La época actual es, desde el ámbito interno de la ingeniería, una era de transición hacia la optimización. Muchos artefactos no son realmente óptimos, pero su grado de funcionalidad es mucho mayor que hace un siglo, y cada innovación busca mejorar estos estándares, con la optimización como meta.

Dentro del proceso de diseño, la optimización se lleva a cabo entre las fases 5 y 7, es decir, entre las etapas de evaluación-solución y la construcción-prueba del prototipo (ver figura 25). Al llegar a la etapa del diseño definitivo (fase 8), se entiende que ya se ha logrado un nivel de optimización satisfactorio.

En la ingeniería moderna, el aspecto de la funcionalidad mínima está contenido en el proceso de diseño, pero sólo como una primera aproximación a la solución del problema. El diseño funcional, que se refiere al cumplimiento de la funcionalidad mínima, queda cubierto prácticamente, desde la etapa 1 (identificación de la necesidad) hasta la elaboración del croquis preliminar en la etapa 6 (diseño preliminar). Esto no significa que, en la técnica tradicional, se llevaran a cabo las primeras cinco etapas del proceso de diseño, tal como hoy se practica en la ingeniería moderna, para el desarrollo de los artefactos de aquella época. Significa que, hasta la elaboración del croquis preliminar, en la etapa 6 del proceso de diseño, éste garantiza tan sólo la funcionalidad mínima en la solución al problema planteado. La elevación de los niveles de funcionalidad, y aún más, la optimización, se logran sólo si se prosigue con las siguientes etapas, que son justamente aquellas en las cuales se recurre a la ciencia. Por ejemplo, para el caso relativo al dispositivo para eliminar la sal del agua (figura 27), el croquis presentado sólo muestra aspectos muy generales, tales como los componentes principales y la forma en que *se supone* que funcionará, es decir, la funcionalidad mínima. Pero, ¿Cuál es el tamaño más adecuado y la forma de las placas y discos? ¿A qué velocidad debe girar el eje que contiene los discos para desalar la mayor cantidad de agua en el menor tiempo posible y el mínimo gasto de energía? ¿Cuál es la cantidad ideal de placas y discos? etc. Estas preguntas van más allá de la mínima funcionalidad, tienen que ver en primer lugar con la búsqueda de la elevación del nivel de funcionalidad, y luego con la optimización de la propuesta de solución. Y no pueden ser resueltas sino en un proceso que, como ya se ha dicho, comprende de la quinta a la séptima etapa del proceso de diseño.

CONCLUSIONES

El caso de la técnica agrícola es un testimonio más de cómo la ciencia está hoy fuertemente vinculada a la solución de muchos de los problemas prácticos más importantes que enfrenta el hombre, en este caso el de la alimentación. Esto no siempre fue así, tal como se puede apreciar en el desarrollo de este trabajo. La ciencia, con antecedentes que datan desde los tiempos de los antiguos griegos, no siempre estuvo vinculada a la solución de los problemas cotidianos de los hombres. De la ciencia se aprecia desde hace mucho tiempo los logros intelectuales, tales como los conceptos, las leyes, las teorías y los métodos. Pero a partir del siglo XIX la ciencia ocupó un lugar dentro de los procesos productivos. La ciencia, una vez que se vinculó a la técnica, ha dado logros materiales, de la misma trascendencia que los logros intelectuales. No es menos importante el aumento en la capacidad de producir alimentos o el tratamiento efectivo de enfermedades, que la comprensión científica del mundo. Sin embargo, el aspecto práctico de la ciencia no es a menudo tratado con la misma profundidad o importancia que el aspecto intelectual de la misma dentro de la filosofía de la ciencia. Se deja esto más bien a disciplinas como la sociología o la economía, en donde el trato a estos temas tiene el sesgo propio de la visión de cada disciplina. No es que los análisis desde estas disciplinas no sean valiosos (en este trabajo se recurrió a muchos de ellos), sino que la filosofía de la ciencia también tiene mucho que decir al respecto.

El trabajo aquí desarrollado ha mostrado un ejemplo del lado práctico de la ciencia. Se ha resaltado cómo la ciencia, al integrarse al conocimiento técnico tradicional, en el caso de la agricultura, ha contribuido a generar soluciones a un tipo de problemas en particular, el de la alimentación humana. Hoy se han reducido considerablemente los problemas de tipo técnico en cuanto a la producción de alimentos. La elevación de los estándares de funcionalidad de las máquinas e instrumentos agrícolas es resultado directo de la integración de ciencia y técnica, y ello ha aumentado la capacidad de supervivencia del hombre. Las hambrunas que en Europa se daban frecuentemente hasta el siglo XIX han sido erradicadas, aunque persisten en algunos países con técnicas agrícolas tradicionales. Sin embargo, las hambrunas actuales son atribuibles a cuestiones que no tienen que ver con la falta de conocimiento. Sigue muriendo mucha gente de hambre en el mundo, pero por problemas de otro tipo, tales como políticos y económicos. La integración de ciencia y técnica ha contribuido a que el problema técnico ha sido resuelto en gran medida.

Pero la aplicación de la ciencia tampoco puede resolver todos los problemas, tal como fue el sueño de Bacon y otros pensadores. No obstante, debido a la escasa comprensión del aspecto práctico de la ciencia, muchos culpan a ésta de situaciones que nada tienen que ver con ella, mientras que otros la consideran como la solución de todos los problemas existentes y por venir. Ambas visiones contradicen el desarrollo histórico de la ciencia. Por ello, es de vital importancia el comprender mejor el aspecto material de la ciencia, a través de trabajos de investigación como el que aquí se ha presentado.

El paso de las técnicas agrícolas tradicionales a las tecnologías agrícolas modernas ha sido analizado utilizando conceptos que son parte de las ciencias de la ingeniería. Es necesario que se profundice el estudio del aspecto práctico de la ciencia a través de otros conceptos y en otros campos de la actividad humana. Aquí se han utilizado los conceptos de funcionalidad y diseño, pero sin duda existen amplias posibilidades con otros conceptos y en otros campos de estudio, tales como la salud, la economía, la educación, etc. La agricultura es sólo uno de los campos de acción del hombre sobre la naturaleza que conforman el vasto campo de intereses materiales del hombre. La comprensión cabal del aspecto práctico de la ciencia depende de que sea abordada la mayor cantidad posible de casos particulares. La técnica es uno de los muchos campos de acción en los cuales la ciencia hoy se ha involucrado. Y este tipo de estudios deben llevarse a cabo dentro del contexto de la filosofía de la ciencia, y no sólo desde disciplinas ajenas como la sociología o la economía.

También es necesario abordar las cuestiones sociales, económicas, políticas, culturales y de otra índole relacionadas con el desarrollo de la tecnología moderna, sustentada en la ciencia. Esto es necesario porque en la actualidad los grandes proyectos y desarrollos tecnológicos involucran investigaciones conjuntas en ciencia y tecnología, grandes cantidades de recursos económicos y afectan a una gran cantidad de grupos sociales que tienen diversas opiniones sobre la conveniencia de las nuevas tecnologías y los nuevos usos de la ciencia. Y la filosofía de la ciencia es uno de los terrenos en donde se debe reflexionar y analizar este tipo de situaciones que caracterizan al mundo industrial moderno.

Por ello, es conveniente que dentro del ámbito de la filosofía de la ciencia, además de abordarse cuestiones tales como la demarcación de las explicaciones científicas, la metodología de la investigación científica y la estructura del conocimiento científico, se profundice en el esclarecimiento de la aplicación de la ciencia a los problemas prácticos del hombre. En este contexto, la ciencia aplicada, ligada a los intereses prácticos del hombre y a las necesidades materiales, requiere ser comprendida a un grado

comparable al de la ciencia básica o teórica, ligada a los logros intelectuales. La mejor comprensión de todos los aspectos que la ciencia moderna presenta permitirán asumir una concepción más equilibrada de ella. Ciertamente para algunos autores la tecnología no ocupa ningún lugar en la concepción de la ciencia, pero para otros está hoy esencialmente ligada. Bunge, Bernal, Russell y Ellul comparten este último punto de vista. En consecuencia, algunos aspectos ligados a la tecnología son incluidos por algunos en el marco de la filosofía de la ciencia, y excluidos por otros.

La historia muestra que en la actualidad y de una manera cada vez más acentuada, la tecnología forma parte de la práctica real de la ciencia. Es un hecho que las ciencias de la realidad no sólo trabajan con conceptos, sino también con cosas, tanto naturales como artificiales. Los actos del científico son entonces tan importantes como su pensamiento para la filosofía de la ciencia, de lo cual deriva que es tan importante la teoría como la práctica real de la ciencia. ¿Quién puede subestimar a la tecnología dentro de la práctica real de la ciencia en las sociedades industriales contemporáneas ?

John D. Bernal le asignó un destacado papel a la técnica moderna dentro del marco de la filosofía de la ciencia. Sugirió una ciencia de la ciencia de gran amplitud, en una concepción tan amplia que conjugue los factores psicológicos, históricos y materiales que conducen al descubrimiento científico y que son necesarios para la planeación de la ciencia. En la concepción de Bernal, sustentada en buena medida en amplios estudios históricos, la ciencia ligada a la técnica es el logro más grande de la humanidad. Mas aún, de las varias formas de influencia de la ciencia en el hombre, Bernal le asignó a la técnica la más importante de todas, por encima del puro conocimiento científico y la cosmovisión científica, por ser la que más ha cambiado al mundo y la que más ligada está hoy a los más grandes logros humanos y a la supervivencia de la misma especie humana. Probablemente no sea para tanto, pero es innegable el valor histórico de logros materiales tales como la agricultura, las comunicaciones, el transporte y la salud en el desarrollo material del hombre, en los cuales la ciencia y la tecnología modernas están involucradas.

Finalmente es preciso considerar que este tipo de problemas conciernen tanto a la filosofía de la ciencia como a la filosofía de la técnica. Los conceptos de funcionalidad y diseño pertenecen al marco interno de la filosofía de la técnica, porque pertenecen a las ciencias de la ingeniería, es decir, al conocimiento técnico, el cual, como se ha apreciado en el desarrollo de este trabajo, es diferente del conocimiento científico. Las ciencias de la ingeniería son temas de estudio de la filosofía de la ciencia debido a que, como cualquier otra ciencia, cumplen todos los atributos adjudicados al conocimiento científico, tales

como demarcación, aplicación del método científico y estructura lógica de los resultados. Pero también son objeto de estudio de la filosofía de la técnica, debido a que, como cualquier ciencia aplicada, tienen una finalidad práctica y no puramente cognitiva; su finalidad no es tanto incrementar el conocimiento de la realidad, sino la búsqueda de algún tipo de utilidad práctica. Las ciencias de la ingeniería constituyen un puente entre la filosofía de la ciencia y la filosofía de la técnica para entender mejor el aspecto práctico de la ciencia.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

INTRODUCCION

1. Einstein, Albert., *Mi visión del mundo*, Barcelona, Tusquets Editores, 1988, pág. 233.
2. Nagel, Ernest., *La estructura de la ciencia*, Barcelona, Paidós, 1991, pág. 11.
3. Russell, Bertrand., *La perspectiva científica*, Madrid, SARPE, 1985, pág. 16.
4. Salomon, Jean-Jacques., et al., *Una búsqueda incierta: ciencia, tecnología y desarrollo*, México, D. F., FCE, 1996, pág. 21.
5. Pytlik, Edward C., et al., *Tecnología, cambio y sociedad*, México, D. F., Representaciones y Servicios de Ingeniería, 1978, pág. xiii.
6. Tondl, L., "On the concepts of 'Technology ' and 'Technological Sciences' ", en AAVV, *Contributions to a philosophy of technology*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1974, al cuidado de Friedrich Rapp, pp. 1-18.

I. MARCO FILOSOFICO CONCEPTUAL

7. Russell, Bertrand., *Religión y ciencia*, México, D. F., FCE, 1994, pág. 9.
8. Bernal, John D., *La ciencia en la historia*, México, D. F., Nueva Imagen, 1997, pág. 40.
9. Bunge, Mario., *La ciencia, su método y su filosofía*, s.l., Ediciones Quinto Sol, s. f., pp. 34-35.
10. Wartofsky, Marx W., *Introducción a la filosofía de la ciencia*, México, D. F., Alianza Editorial, 1986, pp. 45-46.
11. Blauberger, I., *Diccionario de filosofía*, México, D. F., Ediciones Quinto Sol, 1996, pp. 45-47.
12. Aristóteles, *Metafísica*, Libro I, Caps. I y II, Buenos Aires, Espasa Calpe, 1945, pp. 15-21.
13. Rapp, Friedrich., *Filosofía analítica de la técnica*, Barcelona, Alfa, 1981, pág. 42.
14. Ibidem, pág. 7.
15. Capanna, Pablo., *La tecnarquía*, Barcelona, Barral, 1973, pág. 17.
16. Ellul, Jacques., *El siglo XX y la técnica*, Barcelona, Editorial Labor, 1960, pág. 15.
17. Rapp, Friedrich., op. cit., pág. 38.
18. Bunge, Mario., *Seudociencia e ideología*, op. cit., pág. 24.
19. Dampier, William C., *Historia de la ciencia*, Madrid, Tecnos, 1986, pág. 19.
20. Ukraintsev, Boris., "Las ciencias de la naturaleza y de la sociedad y el saber técnico", en *Hombre, ciencia, técnica; enfoque filosófico*, Instituto de Filosofía de la Academia de Ciencias de la URSS, pp. 183-188, Buenos Aires, Editorial Cartago, pág. 187.
21. González Casanova, 1987, citado por Méndez Ramirez, I., "Relación entre investigación científica e investigación tecnológica", en *El sistema de ciencia y tecnología en México*, pp. 107-122, México, D. F., UNAM, pág. 110.
22. Kedrov, B. y Spirkin, A., *Qué es la ciencia*, México, Ediciones Quinto Sol, 1992, pp. 7-8.
23. Bunge, Mario., *Ciencia y desarrollo*, Buenos Aires, Ediciones Siglo Veinte, pág. 33.
24. Leff, Enrique., *Ciencia, técnica y sociedad*, México, D. F., ANUIES, 1977, pp. 138-139.
25. Ibidem, pág. 140.
26. Bunge, Mario., *Ciencia y desarrollo*, op. cit., pág. 34.
27. Bunge, Mario., *Seudociencia e ideología*, México, D. F., Alianza Universidad, 1986, pág. 33.
28. Bunge, M., op. cit., pág. 35.
29. León López, E., *La ingeniería en México*, México, D. F., LIMUSA, 1989, pág. 12.
30. Documento de la carrera de ingeniero mecánico agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx., 1996, pág. 4
31. Hunt, Donnel R. y Garver, Lester W., *Farm Machinery mechanisms*, Ames, The Iowa State University Press, pág. 1.

32. Rapp, F., op. cit., pp. 97-102.
33. Marx, Karl. *Capital y tecnología. Manuscritos inéditos (1861-1863)*, al cuidado de Piero Bolchini, México, D. F., Terra Nova, 1980, pp. 71-140.
34. Ibidem, pág. 76.
35. Ibidem, pág. 74.
36. Ibidem, pág. 76.
37. Ibidem, pág. 78.

II. TECNICA AGRICOLA TRADICIONAL

38. Wartofsky, Marx W., op. cit., pp. 66-89.
39. Ellul, Jacques., op. cit., pp. 66-78.
40. Ellul, Jacques., op. cit., pp. 66-67.
41. Chavaillon, Jean., *La edad de oro de la humanidad; crónicas del Paleolítico*, Barcelona, Ediciones Península, 1998, pág. 30.
42. Ibidem, op. cit., pp. 32-33.
43. Howwell, F. Clark., *El hombre prehistórico*, Enciclopedia Time-Life, México, D. F., Offset Multicolor, 1980, pp. 101-115-
44. Derry, T. K. y Williams, Trevor., *Historia de la tecnología*, vol. 1, México, D. F., Siglo XXI, 1997, pág. 10.
45. Drucker, Peter F. "La primera revolución tecnológica y sus lecciones", (pag. 41-50), en *Tecnología y cultura*. Barcelona, 1972, pag. 42,
46. Rodríguez Vallejo, José., *Historia de la agricultura y de la fitopatología (con especial referencia a México)*, Montecillo, Texcoco, Colegio de Postgraduados, 1992, pp. 5-24.
47. Derry y Williams, vol. 1, op. cit., pp. 76-77.
48. Childe, V. Gordon., *Los orígenes de la civilización*, Buenos Aires, FCE, 1992, pág. 112.
49. Quick, Graeme R. y Buchele, Wesley F., *The grain harvesters*, USA, American Society of Agricultural Engineers, 1978, pág. 6.
50. Meier, Helmut M. E., "Tecnología agropecuaria y forestal -I; Principios de tecnología agropecuaria, labores y procedimientos productivos", en *Enciclopedia sistemática agropecuaria*, Barcelona, Editorial Aedos, 1980, pág.
51. Huberman, Leo., *Los bienes terrenales del hombre*, México, D. F., Editorial Nuestro Tiempo, 1982, pág. 60.
52. Flint, Charles L, citado por Rush, Dorothy R: "Un hombre fornido que aguante", en *Fuerza para producir en la agricultura*, Anuario de Agricultura 1960. USDA, pag. 12-13.
53. Ibidem, pag. 13.
54. Ellul, Jaques. Op. cit., pag. 68.
55. Nagel, Ernest., *La estructura de la ciencia*, Barcelona, Ediciones Paidós, 1991, pp. 15-26.
56. Rapp, F., op. cit., pág. 92.
57. Wartofsky, M. W., op. cit., pág. 84.
58. Marx, Karl., op. cit., pág. 76.
59. Ibidem, pag. 69.
60. Huberman, Leo., op. cit. pág. 74.
61. Derry, y Williams, op. cit., vol. 3, pág. 1034.
62. Huberman, Leo., op. cit., pág. 78.
63. Ibidem, pag. 987.

III. INICIOS DE LA MECANIZACION AGRICOLA: PERIODO DE TRANSICION

64. Braverman, Harry., *Trabajo y capital monopolista; la degradación del trabajo en el siglo XIX*, México, D. F., Editorial Nuestro Tiempo, 1987, pág. 187.
65. Derry, T. K. Y Williams, T. I., vol. 2, op. cit., pág. 406.
66. Bernal, John D., op. cit., pág. 521.
67. Crombie, A. C. *Historia de la ciencia*, vol. 2, Madrid, Alianza Editorial, 1974, pág. 114.
68. Sarton, George., *Seis alas; hombres de ciencia renacentistas*, Buenos Aires, Editorial Universitaria de Buenos Aires, 1965, pág. 219.
69. Bernal, John D., op. cit., pág. 412.
70. Hankins, Thomas L., *Ciencia e ilustración*, Madrid, Siglo XXI Editores, 1988, pág. 24.
71. Bernal, John D., op. cit., pág. 569.
72. Ibidem, pág. 572.
73. Ibidem, pág. 568.
74. Ibidem, pág. 525.
75. Ibidem, pág. 571.
76. Ibidem, paá. 573.
77. Derry, T. K. y Williams, T. I., vol. 3, op. cit., pág. 986.
78. Ibidem, pág. 987.
79. Derry, T. K. y Williams, T. I., vol. 1, op. cit., pp. 107-108.
80. Bairoch, P., citado por Tortolero Villaseñor, A. en *De la coa a la máquina de vapor; actividad agrícola e innovación tecnológica en las haciendas mexicanas: 1880-1914*, México, D. F., SigloXXI, 1995, pág. 12.
81. Tortolero Villaseñor, A., op. cit., pág. 102.
82. Derry, T. K. y Williams, T. I., vol. 3, op. cit., pag. 987.
83. Derry, T. K. y Williams, T. I., vol. 3, op. cit., pág. 1001.
84. Ibidem, pág. 1003.
85. Citado por Rush, Dorothy R., op. cit., pág. 14.
86. Citado por Johnston, Bruce F. y Kilby, P., (1975) *Agricultura y transformación estructural*, México, D. F., FCE, 1987, pág. 234.
87. Citado por Rush, Dorothy R., op. cit., pág. 16.
88. Derry, T. K. y Williams, T. I., op. cit., pág. 1008.

IV. LA MECANIZACION EN LA TECNOLOGIA AGRICOLA MODERNA

89. Rush, Dorothy R., op. cit., pág. 31.
90. Ibidem, pág. 33.
91. Wendel, C. H., *Great farm tractors*, China, Bison Group, 1995, pág. 15.
92. Quick, G. R. y Buchele, W. F., *The grain harvesters*, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, 1978, pág. 105.
93. Bernal, John D., *Ciencia e industria en el siglo XIX*, Barcelona, Ediciones Martínez Roca, pág. 33.
94. Derry, T. K. y Williams, T. I., vol. 3, op. cit., pág. 1008.
95. Bernal, John D., op. cit., pág. 42.
96. Hall, A. R., *Ballistics in the seventeenth century*, Cambridge, 1952; citado por Bernal, John D., *Ciencia e industria en el siglo XIX*, op. cit., pág. 26.
97. De la teoría desarrollada por Carnot se deduce que la eficiencia con que se obtiene trabajo mecánico útil a partir del calor generado por la ignición del combustible en un motor, es mayor mientras mayor sea la diferencia entre la temperatura caliente y la fría en el motor. La temperatura caliente corresponde a la que se alcanza en el momento en que se quema el combustible, mientras

que la fría corresponde al medio de refrigeración del motor. El medio de refrigeración puede ser un líquido, como agua o aceite, o un flujo de aire obligado a circular en el motor. En consecuencia, mientras más elevada sea la temperatura caliente, mayor trabajo útil se obtiene de un motor. Sin embargo, para que un motor alcance temperaturas elevadas sin dañar sus componentes, se requiere de un sistema de refrigeración efectivo, para que las altas temperaturas disminuyan de manera casi instantánea. Por ello, un buen sistema de refrigeración permite manejar temperaturas más altas, y en consecuencia, mayor eficiencia del motor.

98. Wendel, C. H., op. cit., pág. 21.
99. Ibidem, pág. 31.
100. Rasmussen, Wayne D., "Progresos de la agricultura norteamericana: la cosechadora mecánica de tomates como un caso de estudio", en *Tecnología y cultura*, pp. 211-224 (cit. pág. 223).
101. Daumas, Maurice., *Las grandes etapas del progreso técnico*, México, D. F., FCE, 1996, pág. 91.
102. Williams, Trevor., *Historia de la tecnología*, vol. 4, op. cit., pág. 5.
103. Noble, David., *El diseño de Estados Unidos*, Madrid, 1987, pág. 32-33.
104. Ibidem, pág. 60.
105. Ibidem, pág. 61.
106. Mills, Robert K., *Implement and tractor, reflexions on 100 years of farm equipmnet*, Marceline, Intertec Publishing Corporation, pág. 94-95.
107. Hunt, Donnell R. et. al. *Farm machinery mechanisms*, Ames, The Iowa State University, 1973, pp. 5-6.
108. Williams, Trevor., op. cit., pág. 7.
109. Un acre es una unidad de medición de superficie, utilizada en Estados Unidos, equivalente a 0.405 hectáreas.
110. Quick, Graeme R. y Buchele, Wesley F., op. cit., pág. 10.
111. Quick, Graeme R. y Buchele, op. cit., pag. 259.
112. Mandel, E., citado en Rindermann, Rita., *Historia económica del mundo contemporáneo en cifras y gráficas*, Chapingo, Méx., Unioversidad Autónoma Chapingo, 1990, pág. 18.
113. Johnston, Bruce F. y Kilby, Peter., op. cit., pág. 225.
114. Smith, Harris P., *Maquinaria y equipo agrícola*, Barcelona, Ediciones Omega, 1967, pág. 10-11.
115. Campos Magaña, S. G. y Cadena Zapata, M. (1997) "Implementos agrícolas de tracción animal desarrollados por INIFAP para el trópico húmedo de México", en *Empleo de animales de trabajo en la agricultura*, Chapingo, Méx., Universidad Autónoma Chapingo, 1997, pág. 156-161.
116. Avdakov, Y. F. et. al. *Historia económica de los países capitalistas*, México, D. F., Grijalvo, 1986, pág. 298.
117. Ortiz-Cañavate, J. y Hernanz, José L., *Técnica de la mecanización agraria*, Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1988, pág. 31.
118. Shelton K.irby, R. et. al. *Engineering in history*, New York, Dover Publications, 1990, pág. 498.
119. Masera Cerutti, Omar., *Crisis y mecanización de la agricultura campesina*, México, D. F., El Colegio de México, 1990, pág. 25.
120. La resistencia de materiales es la ciencia de la ingeniería que estudia los efectos internos en un cuerpo sometido a ciertas fuerzas con el fin de establecer las condiciones de falla, que consisten en roturas o deformaciones del cuerpo.
121. Soehne, W., "Investigations on the shape of plough bodies for high speeds", citado por McKyes, Edward., *Soil cutting and tillage*, op. cit., pág. 82.
122. Fanger, P. O., "Thermal Comfort: Analisis and applications in Environmental Engineering", citado por Liljedahl, John B. et. al. *Tractores y sus unidades de potencia*, México, D. F., LIMUSA, 1984, pág. 230.

V. FRANCIS BACON Y LA TECNOLOGIA MODERNA

123. Butterfield, Herbert., *Los orígenes de la ciencia moderna*. México, D. F., CONACYT, 1981, pág. 140.
124. Bacon, Francis., *La gran restauración*, Madrid, Alianza Editorial, 1985, pág. 50.
125. Ibidem, pág. 144 -145.
126. Bacon, Francis. Citado por Dubos, René., *Los sueños de la razón*. México, D. F., FCE, 1978, pág. 29.
127. Bacon, Francis., op. cit., pág. 64.
128. Citado por Dubos, René., op. cit., pág. 39.
129. Citado en *Newton (1983)*, *Colección Protagonista de la civilización*, Madrid, Debate/Itaca, pág. 15.
130. Bacon, Francis., (1627) *La Nueva Atlántida*, México, D. F., Porrúa, 1991, pág. 209.
131. Ibidem, pág. 206.
132. Citado por Bernal, John D., en *La ciencia en la historia*, op. cit., pág. 436.
133. Dubos, René., op. cit., pág. 40.
134. Ibidem, pág. 41.
135. Ibidem.

VI. CIENCIA Y METODOLOGIA DE DISEÑO EN LA INGENIERIA MODERNA

136. Shigley, Joseph E. y Mischke, Charles R., *Diseño en ingeniería mecánica*, México, D. F., McGraw-Hill, 1994, pág. 4.
137. Norton, Robert L., *Diseño de maquinaria*, México, D. F., McGraw-Hill, 1995, pág. 7
138. Krick, Edward V., *Introducción a la ingeniería y al diseño en la ingeniería*, México, D. F., Limusa, 1990, pág. 121.
139. Jaimes Jaimes, J., y Torres Aguilar, S., *Diseño y construcción de una máquina extractora de semilla de tomate de cáscara*, Tesis profesional, Chapingo, Méx., Universidad Autónoma Chapingo, 1995, pág. 29.
140. Krick, Edward V., op. cit., pág. 19.
141. Dixon, John R., *Diseño en ingeniería e inventiva; análisis y toma de decisiones*, México, D. F., Limusa, 1979, pág. 20.
142. Baird, D. C., 1991. *Experimentación; una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*, México, D. F., Prentice-Hall, pp. 54–55.
143. Feodósiev, V. I., *Diez conferencias sobre resistencia de materiales*, URSS, Mir Moscú, 1973, pág. 9.
144. Dixon, John R., op. cit., pág. 71.
145. Baird, D. C., op. cit., pág. 56.
146. Krick, Edward V., op. cit., pág. 79.
147. Chapra, Steven C. y Canale, Raymond P., *Metodos numéricos para ingenieros, con aplicaciones en computadoras personales*, México, D. F., McGraw-Hill, 1990, pág. 11.
148. Tijonov, A. N. y Kostomárov, D. P., Algo acerca de la matemática aplicada, URSS, Mir Moscú, 1983, pág. 13.
149. Feodósiev, V. I., op. cit., pág. 37.
150. Dixon, John R., op. cit., pág. 72–73.
151. El valor de g es aproximadamente igual a 980 cm/s^2 , donde cm indica medida de longitud en centímetros y s indica medida de tiempo en segundos.
152. Hibbeler, R. C., *Mecánica para ingenieros: dinámica*. México, D. F., CECSA, 1986, pág. 13.

153. Dixon, John R., op. cit., pág. 220-227.
154. Detushman, Aaron D., *Diseño de máquinas, teoría y práctica*, México, D. F., CECSA, 1987, pág. 18.
155. Tijonov, A. N., op.cit., pág. 25.
156. Norton, Robert L., op. cit., pág. 14.
157. Baird, D. C., op. cit., pág. 57.
158. Norton, Robert L., op. cit., pág. 14.
159. Shigley, Joseph E. y Mischke, Charles R., op. cit., pág. 8.
160. Krick, Edward V., op. cit., pág. 91.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Ashton, T. S., *La revolución industrial*, México, D. F., Fondo de Cultura Económica, 1995, 195 pp.
- Avdakov, Y. F. et. al. *Historia económica de los países capitalistas*, México, D. F., Grijalvo, 1986, 595 pp.
- Bacon, Francis., *La gran restauración*, Madrid, Alianza Editorial, 1985.
- Bacon, Francis., *Instauratio Magna; Novum Organum; La Nueva Atlántida*, México, D. F., Porrúa, 1991, 214 pp.
- Baird, D. C., *Experimentación; una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*, México, D. F., Prentice-Hall, 1991, 207 pp.
- Bernal, John D., *Ciencia e industria en el siglo XIX*, Barcelona, Ediciones Martínez Roca, 1973, 191 pp.
- Bernal, John D., *La ciencia en la historia*, México, D. F., Nueva Imagen, 1997, 693 pp.
- Bernal, John D., *La ciencia en nuestro tiempo*, México, D. F., Nueva Imagen, 1992, 534 pp.
- Blauberg, I., *Diccionario de filosofía*, México, D. F., Ediciones Quinto Sol, 1996, 406 pp.
- Braverman, Harry., *Trabajo y capital monopolista; la degradación del trabajo en el siglo XIX*, México, D. F., Editorial Nuestro Tiempo, 1987, 513 pp.
- Bruce F. y Kilby, P., *Agricultura y transformación estructural*, México, D. F., Fondo de Cultura Económica, 1987, 506 pp.
- Bunge, Mario., *Ciencia y desarrollo*, Buenos Aires, Ediciones Siglo Veinte, 1980, 175 pp.
- Bunge, Mario., *La ciencia, su método y su filosofía*, s.l., Ediciones Quinto Sol, s. f., 110 pp.
- Bunge, Mario., *Seudociencia e ideología*, México, D. F., Alianza Universidad, 1986, 253 pp.
- Bunge, M. "Technology as applied science", en AAVV, *Contributions to a philosophy of technology*, pp. 19-39, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1974, al cuidado de Friedrich Rapp.
- Butterfield, Herbert., *Los orígenes de la ciencia moderna*. México, D. F., CONACYT, 1981, 327 pp.
- Campos Magaña, S. G. y Cadena Zapata, M., "Implementos agrícolas de tracción animal desarrollados por INIFAP para el trópico húmedo de México", en *Empleo de animales de trabajo en la agricultura*, Chapingo, Méx., Universidad Autónoma Chapingo, 1997, pág. 156-161.
- Capanna, Pablo., *La tecnarquía*, Barcelona, Barral, 1973, 254 pp.
- Chapra, Steven C. y Canale, Raymond P., *Metodos numéricos para ingenieros, con aplicaciones en computadoras personales*, México, D. F., McGraw-Hill, 1990, 641 pp.

- Chavaillon, Jean., *La edad de oro de la humanidad; crónicas del Paleolítico*, Barcelona, Ediciones Península, 1998, 230 pp.
- Childe, V. Gordon., *Los orígenes de la civilización*, Buenos Aires, Fondo de Cultura Económica, 1992, 291 pp.
- Christianson, L. L. y Rorhbach, R. P., *Design in agricultural engineering*, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, 1986, 310 pp.
- Crombie, A. C. *Historia de la ciencia*, vol. 2, Madrid , Alianza Editorial, 1974, 354 pp.
- Cruz León, Artemio., *...Y sigue la yunta andando*, Chapingo, Méx., Univesridad Autónoma Chapingo, 1997, 173 pp.
- Cruz León, Artemio., *Los instrumentos agrícolas en la zona central de Veracruz*, Chapingo, Méx., Universidad Autónoma Chapingo, 1989, 267 pp.
- Dampier, William C., *Historia de la ciencia*, Madrid, Tecnos, 1986, 570 pp.
- Daumas, Maurice., *Las grandes etapas del progreso técnico*, México, D. F., Fondo de Cultura Económica, 1996, 151 pp.
- Derry, T. K. y Williams, Trevor., *Historia de la tecnología*, desde la antigüedad hasta 1900, vol. 1, 2 y 3., México, D. F., Siglo XXI, 1997, 1152 pp.
- Detushman, Aaron D., *Diseño de máquinas, teoría y práctica*, México, D. F., CECSA, 1987, 973 pp.
- Dixon, John R., *Diseño en ingeniería e inventiva; análisis y toma de decisiones*, México, D. F., Limusa, 1979, 398 pp.
- Documento de la carrera de ingeniero mecánico agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx., 1996, 69 pp.
- Drucker, Peter F. “La primera revolución tecnológica y sus lecciones”, , en *Tecnología y cultura*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 1979, pp. 41-50.
- Dubos, René., *Los sueños de la razón*. México, D. F., Fondo de Cultura Económica, 1978, 158 pp.
- Einstein, Albert., *Mi visión del mundo*, Barcelona, Tusquets Editores, 1988, 274 pp.
- Ellul, Jacques., *El siglo XX y la técnica*, Barcelona, Editorial Labor, 1960, 393 pp.
- Feodósiev, V. I., *Diez conferencias sobre resistencia de materiales*, URSS, Mir Moscú, 1973, 180 pp.
- Ferré, Frederick., *Philosophy of technology*, New Jersey, Prentice Hall, 1988, 147 pp.
- Flint, Charles L, citado por Rush, Dorothy R: “Un hombre fornido que aguante”, en *Fuerza para producir en la agricultura*, Anuario de Agricultura 1960, USDA.

- Goering, Carroll E., *Engine and tractor power*, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, 1992, 539 pp.
- Gray, R. B., *The agricultural tractor: 1855-1950*, Part I, Saint Joseph, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, 1975, 91 pp.
- Hankins, Thomas L., *Ciencia e ilustración*, Madrid, Siglo XXI Editores, 1988 (1ª. Ed. en inglés, 1985), 231 pp.
- Hibbeler, R. C., *Mecánica para ingenieros: dinámica*. México, D. F., CECSA, 1986, 599 pp.
- Hide, Don., *Tecnics and praxis*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1979, 151 pp.
- Howwell, F. Clark., *El hombre prehistórico*, Enciclopedia Time.Life, México, D. F., Offset Multicolor, 1980, 200 pp.
- Huberman, Leo., *Los bienes terrenales del hombre*, México, D. F., Editorial Nuestro Tiempo, 1982, 378 pp.
- Hunt, Donnel R. y Garver, Lester W., *Farm Machinery mechanisms*, Ames, The Iowa State University Press, 319 pp.
- Issa G., Jorge., *Aproximación a la metodología de las ciencias sociales*, México, D. F., Univesidad Autónoma Metropolitana, 1994, 431 pp.
- Jaimés Jaimés, J., y Torres Aguilar, S., *Diseño y construcción de una máquina extractora de semilla de tomate de cáscara*, Tesis profesional, Chapingo, Méx., Universidad Autónoma Chapingo, 1995, 156 pp.
- Kedrov, B. y Spirkin, A., *Qué es la ciencia*, México, Ediciones Quinto Sol, 1992), 156 pp.
- Krick, Edward V., *Introducción a la ingeniería y al diseño en la ingeniería*, México, D. F., Limusa, 1990, 144 pp.
- Leff, Enrique., *Ciencia, técnica y sociedad*, México, D. F., ANUIES, 1977, 175 pp.
- León López, E., *La ingeniería en México*, México, D. F., LIMUSA, 1989, 261 pp.
- Liljedahl, John B. et. al. *Tractores y sus unidades de potencia*, México, D. F., LIMUSA, 1984, 432 pp.
- Marx, Karl., *Capital y tecnología; manuscritos inéditos (1861-1863)*, al cuidado de Piero Bolchini, México, D. F., Terra Nova, 1980, 164 pp.
- Masera Cerutti, Omar., *Crisis y mecanización de la agricultura campesina*, México, D. F., El Colegio de México, 1990, pág. 25.
- McKyes, Edward., *Soil cutting and tillage*, Amsterdam, Elsevier Science Publisher, 1985, 217 pp.

Meier, Helmut M. E., "Tecnología agropecuaria y forestal -I; Principios de tecnología agropecuaria, labores y procedimientos productivos", en *Enciclopedia sistemática agropecuaria*, Barcelona, Editorial Aedos, 1980, 378 pp.

Méndez Ramirez, I., "Relación entre investigación científica e investigación tecnológica", en *El sistema de ciencia y tecnología en México*, México, D. F., UNAM, 1987, pp. 107-122.

Mills, Robert K., *Implement and tractor, reflexions on 100 years of farm equipmnet*, Marceline, Intertec Publishing Corporation, 511 pp.

Nagel, Ernest., *La estructura de la ciencia*, Barcelona, Paidós, 1991, 556 pp.

Newton, Col. Protagonista de la civilización, Madrid, Debate/Itaca, 1983, 77 pp.

Noble, David., *El diseño de Estados Unidos*, Madrid, Ministerio de trabajo y seguridad social, 1987, 438 pp.

Norton, Robert L., *Diseño de maquinaria*, México, D. F., McGraw-Hill, 1995, 794 pp.

Olivé, León., *Cómo acercarse a la filosofía*, México, D. F., Limusa, 1991.

Ortiz-Cañavate, J. y Hernanz, José L., *Técnica de la mecanización agraria*, Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1988, 641 pp.

Pytlik, Edward C., et al., *Tecnología, cambio y sociedad*, México, D. F., Representaciones y Servicios de Ingeniería, 1978, 299 pp.

Quick, G. R. y Buchele, W. F., *The grain harvesters*, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, 1978, 269 pp.

Rapp, Friedrich., *Filosofía analítica de la técnica*, Barcelona, Alfa, 1981, 211 pp.

Rasmussen, Wayne D., "Progresos de la agricultura norteamericana: la cosechadora mecánica de tomates como un caso de estudio", en *Tecnología y cultura*, pp. 211-224.

Rindermann, Rita., *Historia económica del mundo contemporáneo en cifras y gráficas*, Chapingo, Méx., Unioversidad Autónoma Chapingo, 1990, 131 pp.

Rodríguez Vallejo, José., *Historia de la agricultura y de la fitopatología (con especial referencia a México)*, Montecillo, Texcoco, Colegio de Postgraduados, 1992, 135 pp.

Russell, Bertrand., *La perspectiva científica*, Madrid, SARPE, 1985, 215 pp.

Russell, Bertrand., *Religión y ciencia*, México, D. F., Fondo de Cultura Económica, 1994, 172 pp.

Salomon, Jean-Jacques., et al., *Una búsqueda incierta; ciencia, tecnología y desarrollo*, México, D. F., Fondo de Cultura Económica, 1996, 586 pp.

Sarton, George., *Seis alas; hombres de ciencia renacentistas*, Buenos Aires, Editorial Universitaria de Buenos Aires, 1965, 301 pp.

Scriven, Michael., "Filosofía de la ciencia", en AAVV, *Ensayos científicos*, México, D. F., CONACYT, 1982, 87-106 pp.

Shelton Kirby, R. et. al. *Engineering in history*, New York, Dover Publications, 1990, 530 pp.

Shigley, Joseph E. y Mischke, Charles R., *Diseño en ingeniería mecánica*, México, D. F., McGraw-Hill, 1994, 883 pp.

Smith, Harris P., *Maquinaria y equipo agrícola*, Barcelona, Ediciones Omega, 1967, 571 pp.

Tijonov, A. N. y Kostomárov, D. P., *Algo acerca de la matemática aplicada*, URSS, Mir Moscú, 1983, 205 pp.

Tondl, L., "On the concepts of 'Technology and Technological Sciences'", en AAVV, *Contributions to a philosophy of technology*, pp. 1-17, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1974, al cuidado de Friedrich Rapp.

Tortolero Villaseñor, A. en *De la coa a la máquina de vapor; actividad agrícola e innovación tecnológica en las haciendas mexicanas: 1880-1914*, México, D. F., SigloXXI, 1995, 412 pp.

Ukraitsev, Boris., "Las ciencias de la naturaleza y de la sociedad y el saber técnico", en *Hombre, ciencia, técnica; enfoque filosófico*, Instituto de Filosofía de la Academia de Ciencias de la URSS, , Buenos Aires, Editorial Cartago, pp. 183-188.

Wartofsky, Marx W., *Introducción a la filosofía de la ciencia*, México, D. F., Alianza Editorial, 1986, 679 pp.

Wendel, C. H., *Great farm tractors*, China, Bison Group, 1995, 128 pp.

Williams, Trevor., *Historia de la tecnología, desde 1900 hasta 1950*, vol. 4 y 5, México, D. F., Siglo XXI, 1997, 607 pp.

Zeldóvich, Ya. y Yaglom, I., *Matemáticas superiores*, URSS, Mir Moscú, 1987, 584 pp.