

**FLUJO EN DOS FASES EN REACTORES
NUCLEARES DE SAL FUNDIDA**

Tesis realizada por
Jesús Jorge Domínguez Alfaro

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Energía y Medio Ambiente)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA
POSGRADO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

FLUJO EN DOS FASES EN REACTORES NUCLEARES DE SAL FUNDIDA

Tesis que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
(ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

Realizado por:

Jesús Jorge Domínguez Alfaro

Matricula: 2203802495

Director:

Dr. Gilberto Espinosa-Paredes

Correo: jorge.dominguez.alfaro@gmail.com

Cel: +52 5539166656

Ciudad de México, diciembre de 2022.

Índice general

Resumen.....	7
Abstract.....	8
Nomenclatura.....	9
1. Introducción.....	12
1.1 Velocidad superficial.....	15
1.2 Criticidad.....	16
2. Antecedentes.....	17
3. Planteamiento del problema.....	20
3.1 Justificación.....	20
3.2 Preguntas de investigación.....	20
3.3 Hipótesis.....	20
3.4 Objetivo general.....	21
3.5 Objetivos particulares.....	21
4. Reactor nuclear de sal fundida.....	22
4.1 Reactor nuclear de sal fundida de espectro térmico.....	25
4.2 Reactor nuclear de sal fundida de espectro rápido.....	25
4.3 Sales combustible.....	26
4.4 Torio (Th).....	28
5. Metodología.....	29
6. Generación de potencia.....	32
7. Modelo unidimensional de flujo relativo.....	35
7.1 Fracción vacío.....	37
7.2 Velocidad de arrastre y parámetro de distribución.....	38
8. Modelo de transferencia de calor del flujo en dos fases.....	41
8.1 Coeficientes efectivos.....	44
8.2 Procedimiento de solución.....	46
8.3 Datos de diseño y parámetros.....	47
9. Implementación.....	49
9.1 Experimentos numéricos de flujo en dos fases en estado estacionario.....	54
9.2 Comparación entre flujo relativo y homogéneo.....	60
10. Experimentos numéricos quasi-estacionario.....	65
10.1 Tiempo τ_L constante.....	65
10.2 Tiempo τ_C constante.....	74
11. Discusión de resultados.....	83
11.1 Flujo en dos fases.....	83
11.2 Acoplamiento Cinética neutrónica y flujo en dos fases.....	84
12. Conclusiones.....	86
Referencias.....	88
Apéndice A.....	92
Apéndice B.....	93
Apéndice C.....	94
Apéndice D.....	95
Apéndice E.....	97
Apéndice F.....	99

Índice de Figuras

Figura 1. Generación de reactores nucleares (Foro nuclear, 2021).	13
Figura 2. Velocidad superficial	15
Figura 3. Diagrama esquemático de un MSR (Luzzi et al., 2012)	22
Figura 4. Núcleo de un MSFR (Aufiero et al., 2014)	24
Figura 5. Decaimiento del Torio	28
Figura 6. Diagrama esquemático del modelo de un reactor nuclear de sal fundida	29
Figura 7. Diagrama esquemático del modelo de cinética neutrónica en un reactor nuclear de sal fundida	32
Figura 8. Componente z de los Coeficientes Efectivos.	45
Figura 9. Distribución de parámetros de flujo relativo.	54
Figura 10. Distribución de fracción vacío	55
Figura 11. Distribución de velocidad superficial.	56
Figura 12. Distribución de velocidad promedio local	57
Figura 13. Distribución de temperatura.	58
Figura 14. Distribución de la caída de presión.	59
Figura 15. Distribución de fracción vacío.	60
Figura 16. Distribución de velocidad superficial.	61
Figura 17. Distribución de velocidad promedio local.	62
Figura 18. Distribución de temperatura.	63
Figura 19. Distribución de la caída de presión.	64
Figura 20. Potencia del reactor nuclear de sal fundida.	65
Figura 21. Temperatura del gas y del líquido dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida	66
Figura 22. Temperatura a la entrada del reactor y del grafito.	67
Figura 23. Temperatura promedio del gas y del líquido	68
Figura 24. Fracción vacío promedio	69
Figura 25. Fracción vacío dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida.	70
Figura 26. velocidades dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida	71
Figura 27. Velocidad superficial del líquido y del gas en el núcleo del reactor	72
Figura 28. Concentración de precursores dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida	73
Figura 29. Potencia del reactor nuclear de sal fundida.	74
Figura 30. Temperatura del gas y del líquido dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida.	75
Figura 31. Temperatura del grafito y a la entrada del núcleo del reactor nuclear de sal fundida.	76
Figura 32. Temperatura promedio del gas y del líquido	77
Figura 33. Fracción vacío dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida.	78
Figura 34. Fracción vacío promedio	79
Figura 35. Velocidades dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida	80
Figura 36. Velocidad superficial del gas y del combustible líquido en el núcleo del reactor de sal fundida	81
Figura 37. Concentración de precursores en el núcleo del reactor de sal fundida.	82
Figura 38. Potencia a diferentes tiempos de circulación del combustible líquido.	85
Figura 39. Distribución de densidad.	95
Figura 40. Distribución de calor específico.	96
Figura 41. Parámetros de flujo relativo τ_L constante.	97
Figura 42. Parámetros de flujo relativos τ_C constante.	98
Figura 43. Perfil de distribución ψ	99

Índice de Tablas

Tabla 1. Combustible por tipo de reactor (Capelli, E. 2012).	26
Tabla 2. Secciones eficaces (Duderstadt et al 1976)	27
Tabla 3. Comparación de la velocidad de arrastre y el parámetro de distribución.	38
Tabla 4. Coeficientes Efectivos de una fracción vacío de 0.002, 0.0067 y 0.1 en la componente z.	45
Tabla 5. Parámetros geométricos del MSFR.	47
Tabla 6. Parámetros de operación del MSFR (Jiménez-Balbuena, 2021).	47
Tabla 7. Condiciones entrada	47
Tabla 8. Cinética neutrónica.	48
Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas del $\text{LiF-ThF}_4\text{-}^{233}\text{UF}_4$ y de las burbujas de helio dependientes de la temperatura.	48
Tabla 10. Otros parámetros	48
Tabla 11. Parámetros de flujo relativo.	54
Tabla 12. Comparación de la fracción de vacíos.	55
Tabla 13. Velocidad superficial del gas y líquido.	56
Tabla 14. Velocidad promedio local.	57
Tabla 15. Temperaturas del gas y del líquido	58
Tabla 16. caída de presión.	59
Tabla 17. Fracción vacío.	60
Tabla 18. velocidad superficial.	61
Tabla 19. Velocidad promedio local.	62
Tabla 20. Temperatura del gas y del líquido en flujo relativo y homogéneo.	63
Tabla 21. Caída de presión.	64
Tabla 22. Potencia a diferentes tiempos τ_C .	65
Tabla 23. Temperatura del gas y del líquido a diferentes tiempos τ_C .	66
Tabla 24. Temperatura de entrada y del grafito a diferentes τ_C .	67
Tabla 25. Temperatura del gas y del líquido	68
Tabla 26. Fracción vacío promedio	69
Tabla 27. Fracción vacío a diferentes τ_C	70
Tabla 28. velocidad del gas, del líquido y relativa a diferentes τ_C	71
Tabla 29. Velocidad superficial del gas y del líquido a diferentes τ_C	72
Tabla 30. Concentración de precursores a diferentes tiempos τ_C .	73
Tabla 31. Potencia del reactor nuclear variando el tiempo τ_L	74
Tabla 32. Temperatura del gas y del combustible líquido a diferentes τ_L .	75
Tabla 33. Temperatura del grafito y a la entrada del reactor cambiando el tiempo τ_L	76
Tabla 34. Temperatura promedio del gas y del líquido.	77
Tabla 35. Fracción vacío en el reactor al variar el tiempo τ_L	78
Tabla 36. Fracción vacío promedio	79
Tabla 37. Velocidad del gas, del combustible y relativa cambiando el tiempo τ_L	80
Tabla 38. Velocidad superficial del gas y del líquido al cambiar el tiempo τ_L	81
Tabla 39. Concentración de precursores en el núcleo al cambiar el tiempo τ_L	82
Tabla 40. Propiedades variables y variando la velocidad superficial.	83
Tabla 41. Propiedades variables usando flujo relativo y flujo homogéneo.	83

Tabla 42. Resultados sistema quasi-estacionario	84
Tabla 43. Densidades	95
Tabla 44. Calor específico.....	96
Tabla 45. Parámetros de flujo relativo τ_L constante	97
Tabla 46. Parámetros de flujo relativos τ_C constante	98

Agradecimientos

Gracias,

A toda mi familia, por brindarme la oportunidad de concluir esta meta en mi vida.

Al Dr. Gilberto Espinosa Paredes, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me oriento en la investigación de esta tesis.

Y al financiamiento recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

Resumen

En esta tesis de maestría, se presenta en análisis dinámico de un reactor Nuclear de Sal Fundida (MSR, por sus siglas en inglés) en presencia de flujo burbujeante altamente disperso. Los modelos matemáticos utilizados consideran la transferencia de calor en flujo en dos fases (líquido-gas) sin equilibrio termodinámico y un modelo de flujos relativos para calcular las velocidades de cada una de las fases y la fracción volumen ocupada por la fase gas (fracción de vacíos). Los efectos de retroalimentación de los procesos neutrónicos con los fenómenos de transporte de calor y cantidad de movimiento, dentro y fuera del núcleo, i.e., en los intercambiadores de calor, son considerados porque son esenciales para entender el comportamiento dinámico del MSR. El decaimiento de los precursores de neutrones (neutrones emitidos después de la fisión), se llevan a cabo dentro y fuera del núcleo del reactor, debido a que el combustible también tiene la función de refrigerante y al pasar por los intercambiadores de calor tiene un efecto sobre la generación de potencia.

La tecnología de reactores de sal fundida data de los años 50, y se están explorando nuevos diseños a partir del año 2002. Como su nombre lo indica el combustible nuclear es líquido, y la configuración es totalmente diferente a los reactores de combustible nuclear sólido, empezando porque no existen ensambles de combustible.

Abstract

This master's thesis presents a dynamic analysis of a Molten Salt Nuclear Reactor (MSR) in the presence of highly dispersed bubbling flow. The mathematical models used consider heat transfer in two-phase flow (liquid-gas) without thermodynamic equilibrium (Jiménez Balbuena, 2021) and a relative flow model (Zuber, 1963) to calculate the velocities of each of the phases and the volume fraction occupied by the gas phase (void fraction). The feedback effects of the neutron processes with heat transport and momentum phenomena, inside and outside the core reactor, (i.e., in the heat exchangers), are considered due that they are essential to understand the dynamic behavior of the MSR. The decay of neutron precursors (neutrons emitted after fission) is carried out inside and outside the reactor core, because the nuclear fuel also has the function of cooling and when passing through the heat exchangers it has an effect on the power generation.

Molten salt reactor technology dates to the 1950s, and new designs are being explored as of 2002. As the name implies, nuclear fuel is liquid, and the configuration is totally different from solid nuclear fuel reactors, starting because there are no fuel assemblies.

Nomenclatura

Letras latinas

A_{x-s}	Área transversal	[m ²]
$a_v h$	Coefficiente volumétrico de transferencia de calor	[W/m ³ *K]
$b_{\theta\theta}$	Variable de cierre asociada a la fuente	[1/m]
C_{f0}	Factor de fracción de fase simple	[-]
C_p	Calor específico	[kJ/kg K]
C_0	Parámetro de distribución	[-]
c	Concentración de precursores de neutrones retardados	[cm ⁻³]
D_h	Diámetro hidráulico	[m]
G_m	Flux de masa	[kg/s]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
h	Entalpía	[kJ/kg]
j	Velocidad superficial	[m/s]
k	Ganancia de control	[-]
k_{hs}	Coefficiente de transferencia de calor por área del intercambiador de calor	[W/K]
k_{lgr}	Coefficiente de transferencia de calor por área del reactor al grafito	[W/K]
$\mathbf{K}_{\theta\theta}$	Coefficiente térmico efectivo asociado a la fuente	[W/m*K]
L	Longitud del núcleo	[m]
n	Densidad neutrónica normalizada	[1/cm ³]
$\mathbf{n}_{\theta\theta}$	Vector normal unitario	[-]
m	Masa	[kg]
P_e	Presión	[Pa]
P	Potencia	[W]
q'''	Generación de potencia volumétrica	[W/m ³]

r	Radio	[m]
s_{θ}	Variable de cerradura asociada a la fuente	[1/m]
T	Temperatura	[T]
t	Tiempo	[s]
$\mathbf{u}_{\theta\theta}$	Coficiente efectivo conductivo-convectivo	[W/m ² *K]
V	Volumen total	[m ³]
v	Velocidad	[m/s]
v_{gj}	Velocidad de arrastre	[m/s]
w	Flujo másico	[kg/s]
x	Calidad	[-]

Letras griegas

α	Coficiente de reactividad	[K ⁻¹]
β	Fracción efectiva de neutrones retardados	[-]
γ	Fracción del generado	[-]
ΔT	Diferencia de temperaturas	[K]
Δt	Paso de tiempo	[t]
Δz	Longitud del nodo	[m]
ε	Fracción volumen	[-]
Λ	Tiempo de generación de neutrones	[s]
λ	Constante de decaimiento	[s ⁻¹]
ρ	Densidad	[kg/m ³]
ρ_0	Reactividad	
ρ_{ext}	Reactividad externa	
ρ_{net}	Reactividad neta	
ρ_{th}	Reactividad térmica	

σ	Tensión superficial	[N/m]
τ_c	Tiempo del combustible en el núcleo	[s]
τ_L	Tiempo del combustible en el lazo externo	[s]
$\phi_{\ell 0}^2$	Multiplicador de flujo en dos fases	[-]
θ	Subíndice o superíndice que representa las fases l, g	

Subíndices

g	Fase gas (burbujas de helio)
gr	Grafito
in	Intercambiador de calor
l	Fase líquida (sal combustible)
m	Mezcla gas-líquido
0	Referencia

1. Introducción

Los reactores nucleares de sal fundida (MSR por sus siglas en inglés) pueden ser reactores térmicos que maximizan la utilización de combustible, o reactores rápidos que minimizan los residuos nucleares, estos reactores prometen ser uno de los sistemas de generación de energía más eficientes ([Ansto, 2021](#)).

Las ventajas de los MSR son la vida útil reducida de los productos de fisión y el diseño muy seguro. Algunos de los productos de fisión gaseosos como el xenón, metales nobles y semi-nobles, de este ciclo del combustible de torio deben extraerse de la sal del combustible, esto se realiza mediante un paso de reprocesamiento en línea llamado proceso de burbujeo de helio, este burbujeo de helio utiliza la insolubilidad de ciertos productos de fisión en la sal para extraerlos ([de Boed, 2018](#)).

Durante más de una década, el Foro Internacional de Generación IV (GIF por sus siglas en inglés) ha puesto énfasis en la colaboración internacional para el desarrollo de sistemas de energía nuclear, buscando una eficiencia mayor en el uso del combustible, la minimización de la producción de residuos, económicamente competitivos y que cumplan con estrictos estándares de resistencia a la seguridad y la proliferación. La categoría de la generación IV de reactores nucleares se muestra en la [Figura 1](#), con el objetivo de llevar a cabo la investigación de seis tipos de reactores nucleares los cuales son ([DoE, 2002](#)):

GFR: Reactor rápido refrigerado por gas, (Gas-Cooled Fast Reactor).

LFR: Reactor rápido refrigerado por plomo, (Lead-Cooled Fast Reactor).

MSR: Reactor de sal fundida, (Molten Salt Reactor).

SFR: Reactor rápido refrigerado por sodio, (Sodium-Cooled Fast Reactor).

SCWR: Reactor supercrítico refrigerado por agua, (Supercritical-Water-Cooled Reactor).

VHTR: Reactor de muy alta temperatura (Very High Temperature Reactor).

Una de las principales desventajas de los reactores de Generación IV, es que cuentan con una experiencia limitada en la construcción, operación y diseño de esta tecnología, a diferencia de generación III+ que cuenta con experiencia previa en reactores.



Figura 1. Generación de reactores nucleares (Foro nuclear, 2021).

Para el diseño de un reactor de sal fundida, el principal objetivo es lograr un reactor de potencia que produzca energía eléctrica a bajo costo (DoE, 2002). Los reactores de sal fundida tienen numerosas ventajas:

- Seguridad contra daños causados por la naturaleza intrínseca del combustible.
- Las sales de fluoruro en general son excelentes refrigerantes.
- Las concentraciones fisionables se ajustan fácilmente de forma continua, lo que significa que no hay exceso de reactividad y no hay necesidad de venenos quemables.
- El Torio terrestre es 3 veces más abundante que el Uranio.
- Los MSR ofrecen grandes ventajas para la destrucción de desechos transuránicos de los reactores tradicionales.

Los resultados de seguridad más importantes provienen de los siguientes factores:

- Los sistemas primario y secundario tienen una presión inferior a 500KPa y no tienen peligro de accidentes debido a la alta presión.
- Las sales de combustible y refrigerante son químicamente inertes y no son explosivas con el aire o el agua.
- El punto de ebullición de la sal de combustible es aproximadamente 1670 K, mucho más alto que la temperatura de operación 973 K.
- La sal de combustible podrá volverse crítica cuando coexista con el moderador de grafito y cumpla con la igualdad del buckling geométrico con el de material.
- Por lo tanto, la sal de combustible derramada no provocará ningún accidente de re-criticidad.
- Los productos de fisión gaseosos como Kr, Xe y T se eliminan continuamente de la sal de combustible, minimizando sus fugas en accidentes y en el procesamiento químico (Gonçalves et al., 2019).

1.1 Velocidad superficial

En los siguientes capítulos se hace referencia al termino velocidad superficial, en el flujo bifásico se produce una separación de las fases en la sección de la conducción, de forma que cada una de ellas puede circular a una velocidad diferente, en el sistema vertical el gas tiende a ir por el centro, la influencia de la gravedad es la misma para los distintos elementos de una sección transversal, por lo que los regímenes son simétricos respecto del centro de la conducción. La velocidad superficial se define como el cociente del flujo volumétrico de ese fluido, puede ser líquido (combustible) o gas (helio), dividido por el área de la sección transversal (núcleo del reactor nuclear), como se observa en la [Figura 2 \(Ramírez, J. L. 2018\)](#).

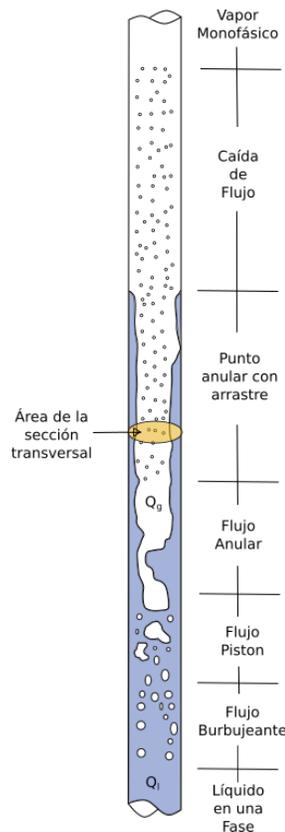


Figura 2. Velocidad superficial

$$j = \frac{\text{Flujo volumétrico (m}^3/\text{s)}}{\text{Área de la sección transversal (m}^2\text{)}} \quad (1.1)$$

j_g :gas, j_l :líquido

1.2 Criticidad

Para que un reactor nuclear sea crítico debe cumplir que el combustible líquido este en contacto con el moderador (grafito) y que además cumpla el criterio de criticidad el cual está dado al comparar el buckling geométrico con el buckling de material. El buckling mide que tanto se pandea o se curva el flujo.

Criticidad \equiv Cuando un flujo de neutrones independiente del tiempo puede sostenerse en el reactor (en ausencia de fuentes diferentes a la fisión).

Para conseguir que un reactor sea crítico, se deben ajustar las dimensiones o la composición del núcleo, de tal forma que el buckling geométrico sea igual al buckling de material ([Espinosa-Paredes et al. 2016](#)), ([Dolan, T. J. 2017](#)).

B_g^2 geométrico

B_m^2 material

$$B_g^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$$

$$B_m^2 = \frac{k_\infty - 1}{L^2}$$

$$B_g^2 = B_m^2 \tag{1.2}$$

2. Antecedentes

En el proyecto terminal I y II de pregrado, se implemento numéricamente un modelo de orden reducido de un reactor nuclear de Sal Fundida, para estudiar el comportamiento dinámico del reactor y de la concentración de precursores en el núcleo y lazo externo para diferentes tiempos de circulación del combustible líquido en el núcleo y el lazo externo ([Dominguez Alfaro, 2020](#)).

Los resultados obtenidos se usaron para un artículo y muestran que el tiempo de circulación del combustible líquido en el lazo externo de los precursores es crucial para la potencia y control del reactor. En ese trabajo se analizó la potencia del reactor con un sistema de control cuya señal fue la reactividad externa ([Espinosa-Paredes et al. 2021](#)).

Los reactores nucleares de sal fundida se considera seguro debido a que la sal (combustible / refrigerante), se congelaría en el caso de una fuga de refrigerante/combustible y no se liberara material radiactivo, teniendo además tanques de almacenamiento subterráneos para la descarga de sales en caso de que la temperatura en el núcleo supere los límites establecidos ([Yoshioka et al., 2017](#)).

De acuerdo con [Wooten & Powers \(2018\)](#), existe un interés por los reactores de combustible en circulación, particularmente los reactores de sal fundida del tipo de combustible fluido, que ha ido creciendo en las últimas dos décadas, y más recientemente como se describe en los siguientes artículos:

[Pázsit et al. \(2014\)](#), revisan la aproximación de la cinética puntual, muestran que para que las ecuaciones sean solubles, es necesario realizar algunas simplificaciones cuya validez no está justificada.

Los autores [Zhang et al. \(2015\)](#) comentan que los reactores de combustible líquido ofrecen problemas muy fascinantes en neutrónica debido a los efectos de los movimientos del combustible en el núcleo y el circuito del reactor. Muestran un modelo cinético espacial que toma en cuenta los efectos del flujo de combustible, a partir de las ecuaciones de neutrones y precursores de neutrones retardados, estudian en particular los efectos del flujo de combustible líquido, muestran que el comportamiento de la potencia relativa, la temperatura de la sal del combustible, la temperatura del grafito y las retroalimentaciones de reactividad son similares debido a las fuertes retroalimentaciones negativas de la reactividad.

Los reactores de sal fundida y la energía nuclear han motivado el interés en desarrollar herramientas computacionales para su análisis de estos sistemas ([Betzler et al., 2017](#)). Los autores desarrollaron un script de Python conocido como ChemTriton para simular el rendimiento del ciclo de combustible de MSR en equilibrio, modelando la sal combustible irradiada, usando sales combustibles con diferentes fuentes de material fisible y optimizar la concentración de torio para mantener un nivel crítico. Además muestran que los productos de fisión de metales nobles, gases volátiles y elementos de tierras raras tienen un fuerte efecto negativo sobre la criticidad en un MSR de espectro térmico alimentado con uranio; su eliminación aumenta significativamente la vida útil del núcleo.

De acuerdo con [Dinamik \(2019\)](#), el modelado dinámico del reactor de sal fundida es muy importante debido al combustible líquido que circula en el circuito primario. Los precursores de neutrones retardados generados en el núcleo pueden desintegrarse en ubicaciones de baja importancia para la criticidad e incluso fuera del núcleo. El autor determina que la cantidad de neutrones rápidos y retardados, y la retroalimentación de la reactividad son muy importantes para el control del reactor.

En el artículo de [Rykhlevskii et al. \(2019\)](#), se presenta un paquete de Python, SaltProc, que se acopla con el código de Monte Carlo, SERPENT2 para simular el reprocesamiento en línea de MSR modelando la composición isotópica cambiante de la sal combustible de MSR.

El artículo de [Bajpai et al. \(2020\)](#), presenta el desarrollo de un modelo de simulación del Reactor Rápido de Sal Fundida (MSFR) para predecir el comportamiento de las burbujas de gas inerte en el núcleo y cuantificar su impacto en la reactividad. Modelaron las burbujas de gas inerte usando un enfoque multifísico que combina la dinámica de fluidos computacional para el flujo de fluidos y la transferencia de calor con la ecuación de difusión de neutrones y una ecuación de equilibrio con términos de difusión. Sus simulaciones revelaron que la distribución de burbujas en el núcleo tiene un impacto significativo en la reactividad.

La circulación de combustible líquido es una característica de los reactores nucleares de sal fundida, y requiere un modelo neutrónico específico ([Diniz et al., 2020](#)). Los autores proponen un modelo de cinética puntual, para un hipotético reactor unidimensional. En el artículo de [Greenwood et al. \(2020\)](#) describe los criterios de modelado de sistemas avanzados y la demostración de las capacidades de modelado de sistemas y el soporte de flujos de trabajo de análisis avanzados.

Respecto a los procesos de transferencia de calor en flujo en dos fases, la tesis de [Jiménez-Balbuena \(2021\)](#), presenta el desarrollo de los coeficientes de transferencia de calor escalados de un reactor nuclear de sal fundida, para diseño, análisis e investigación. Una particularidad en la operación de este tipo de tecnología es la inyección de burbujas de helio en el núcleo del reactor para remover los productos de fisión gaseosos. La tesis aborda el análisis de las complejas interacciones entre las burbujas de helio dispersas en el combustible nuclear líquido, desde los procesos de transferencia de calor en un sistema heterogéneo de flujo en dos fases. Los principales resultados que obtuvo es un modelo escalado de los procesos de transferencia de calor que involucra la temperatura de dos fases (modelo de no equilibrio térmico), una para la fase líquida (combustible nuclear) y otra para la fase gas (burbujas de helio), así como los coeficientes efectivos de transferencia de calor, representativos a la escala del reactor.

3. Planteamiento del problema

Entender el comportamiento de la potencia en presencia de burbujas en el combustible líquido de un reactor nuclear de sal fundida.

3.1 Justificación

Los reactores nucleares de sal fundida son reactores de Generación IV, siendo el único que genera energía con combustible nuclear en estado líquido, y dicho combustible constituye también el flujo enfriador. Ha sido poco estudiado el efecto del termo-fluido y la generación potencia por la presencia de burbujas de Helio. Esta tecnología utiliza una mezcla de sales flúor de uranio como combustible disuelto en flúor de litio y burbujas de helio que se utiliza para remover los productos de fisión insolubles. Este tipo de reactor está diseñado a prueba de accidentes severos.

3.2 Preguntas de investigación

¿Qué importancia tiene la presencia de burbujas en el comportamiento del reactor nuclear de sal fundida?

¿Qué importancia tiene la aproximación de no-equilibrio termodinámico entre las burbujas de helio y el combustible líquido en los fenómenos de retroalimentación neutrónico?

¿Qué diferencia existe entre la aproximación de flujo homogéneo y la de flujos relativos en el comportamiento del reactor de sal fundida?

3.3 Hipótesis

Un modelo transitorio y unidimensional de flujos relativos para describir las velocidades diferentes de las fases gas y líquida y no-equilibrio termodinámico, puede explicar el comportamiento del reactor de sal fundida con retroalimentación en la generación de potencia.

3.4 Objetivo general

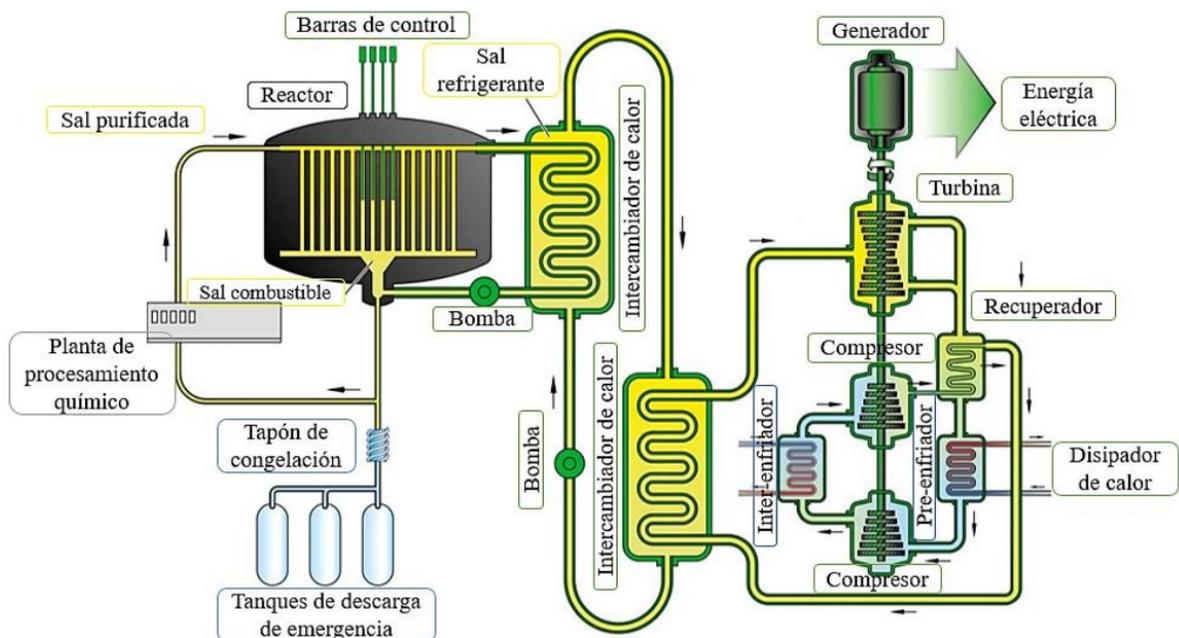
Desarrollar un simulador computacional para análisis dinámico de un reactor nuclear de sal fundida con efectos de flujo en dos fases.

3.5 Objetivos particulares

- Desarrollar un modelo que incorpore en forma dinámica y simultánea los balances de masa, energía y cantidad de movimiento para flujo en dos fases.
- Desarrollar un modelo de los procesos neutrónicos de generación de potencia.
- Desarrollar la solución numérica, acoplamiento, implementación y simulación.

4. Reactor nuclear de sal fundida

La mezcla de sal fundida, que es el combustible y a la vez el refrigerante, fluye a través del núcleo del reactor construido por grafito cuando es un reactor de espectro de neutrones térmicos, la sal fundida llega hasta un intercambiador de calor primario, donde el calor se transfiere a un refrigerante secundario de la sal fundida, la sal primaria fluye de regreso al núcleo del reactor. El calor se genera dentro del núcleo directamente por la mezcla de sal fundida primaria, la sal combustible líquido entra a la vasija del reactor y sale del mismo a mayor temperatura, con una presión de alrededor de una atmosfera (Forsberg et al., 2003), el diagrama esquemático se muestra en la [Figura 3](#).



[Figura 3](#). Diagrama esquemático de un MSR (Luzzi et al., 2012)

Partes del sistema del reactor nuclear de sal fundida se muestran en la [Figura 4](#):

- Recipiente del reactor: Contiene el núcleo y los sistemas de circuito de combustible debe estar lleno con un gas inerte a una temperatura de 673.15°C , sirve para contener la sal si existiese un derrame se solidifique inmediatamente, evitando algún riesgo.
- Bomba: el sistema tiene 16 bombas, se utilizan para para impulsar la sal combustible.
- Intercambiador de Calor: cuenta con 16 intercambiadores, son importantes para el control del reactor, se utilizan para la transferencia de calor con el fin de generar energía.
- Tuberías: Las tuberías en las que fluye la sal combustible se encuentran bajo un estrés térmico estas requieren un escudo térmico por dentro y una protección térmica por fuera.
- Inyección de burbujas: El sistema tiene 16 inyectores de burbujas, sirven para extraer productos de fisión insoluble contenidas en la sal, se busca que por medio de la flotación (capilaridad) se eliminen las partículas metálicas y extraer FP gaseoso antes de su descomposición en la sal ([Allibert et al., 2016](#)).
- Separador de burbujas: Utiliza 16 que se encuentran conectados a la unidad de reprocesamiento de gas, para que el gas reprocesado se redirija a la inyección de burbujas.
- Sistema de drenaje: Sistema de seguridad la sal combustible es evacuada por gravedad bajo el reactor donde se enfría.
- Núcleo: Tiene una geometría cilíndrica la cual tiene una altura igual al diámetro, teniendo una distribución del volumen total de la sal combustible la mitad dentro del núcleo y la otra mitad en el circuito de combustible interno. En el núcleo se llevan el mayor número de fisiones.
- Sal Combustible: Inicialmente contiene 77.5 % mol de fluoruro de litio (LiF) con 22.5 % mol de núcleos pesados fisiles y fértiles, que corresponde al 2.5 % mol de ^{233}U y 20 % mol de ^{232}Th .
- Manta Fértil: No contiene núcleos fisiles y se utiliza para reproducir combustible dentro del reactor, conteniendo el mismo tipo de sal que la sal combustible, en su lugar cuenta con 22.5% mol de ^{232}Th que produce ^{233}U , de los núcleos de uranio producidos.
- Reflectores superiores e inferiores construidos con hastelloy (aleación de cobalto, cromo, níquel y molibdeno) NiCrW, utilizado como reflector de neutrones, el reflector superior

requiere protección térmica porque está expuesto a un alto estrés mecánico, térmico y de radiación, el reflector inferior está acoplado al sistema de drenaje.

- Protección Neutrónica: es utilizado para la protección de los intercambiadores de calor de los neutrones que escapan del núcleo y está hecha de carburo de boro (B_4C) con un grosor de alrededor de 20 cm y absorbe más del 99% de los neutrones que escapan.

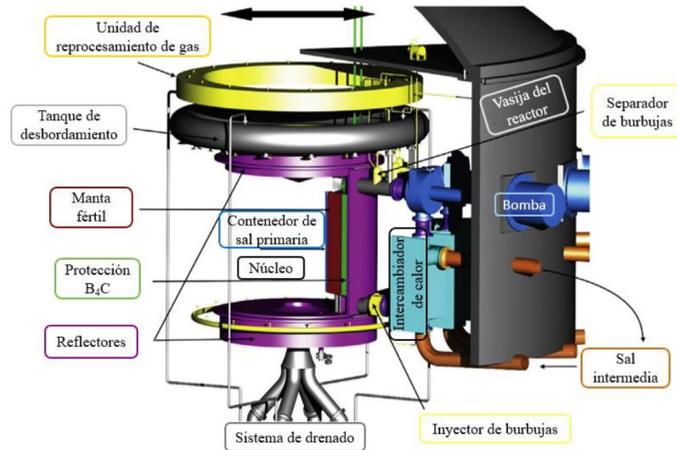


Figura 4. Núcleo de un MSFR (Aufiero et al., 2014)

4.1 Reactor nuclear de sal fundida de espectro térmico

Los MSR (Molten Salt Reactor) se pueden dividir en dos subclases:

- (i) En la primera el material fisionable se disuelve en la sal de fluoruro fundido.
- (ii) En la segunda la sal de fluoruro fundida sirve como refrigerante de un núcleo.

Desde 2010 estudian los posibles problemas que pueden surgir debido al combustible, y a las altas temperaturas ([DoE, 2002](#)):

- Las propiedades químicas y termodinámicas de la sal, incluso con elementos transuránicos.
- Técnicas eficientes para la extracción de gas del refrigerante.
- Modelos avanzados de acoplamiento neutrónico rápido y/o térmico.
- Análisis de las interacciones de la sal con el aire o el agua en caso de un accidente.
- Análisis de los escenarios de accidentes.
- Tratamiento de la sal: pruebas de extracción reductora de actínidos.

4.2 Reactor nuclear de sal fundida de espectro rápido

El MSFR (Molten Salt Fast Reactor) es un reactor rápido que utiliza como combustible líquido una mezcla de fluoruros de torio y uranio (UF_4 , ThF_4) dispersos en sal fundida de fluoruro de litio (LiF), siendo el litio un absorbente alto de neutrones. Con espectro rápido elimina las criticidades vinculadas al grafito, y aumenta la seguridad intrínseca del núcleo ([Merle-Lucotte et al., 2008](#)).

La sal combustible de un reactor nuclear rápido requiere de un sistema de precalentamiento, pues esta inicialmente se encuentra solidificada ([Du et al., 2017](#)). El precalentamiento se lleva a cabo mediante calentadores eléctricos que funden la sal, la cual es posteriormente contenida en tanques de almacenamiento que suministran el núcleo del reactor ([Gérardin et al., 2017](#)).

4.3 Sales combustible

Es importante para el diseño y la seguridad del reactor nuclear de sal fundida la selección de la composición de la sal combustible, esta influye en casi todas las opciones de diseño al definir los parámetros de funcionamiento (temperatura y presión) y el esquema de reprocesamiento. Se debe tener en cuenta diferentes propiedades en el contexto de la neutrónica, la química, las propiedades térmicas y transporte (Capelli, E. 2012).

En la [Tabla 1](#) se presenta un resumen de las composiciones posibles para los diversos diseños de MSR. La primera sal combustible utilizado fue llamada FLIBE, que es una mezcla de LiF y BeF₂ enriquecido (Capelli, E. 2012).

[Tabla 1](#). Combustible por tipo de reactor (Capelli, E. 2012).

Tipo de Reactor	Alimentación	Espectro de neutrones	Sal
MSRE	²³⁸ U, ²³⁵ U	Térmico	LiF-BeF ₂ -ZrF ₄ -UF ₄
MSBR	²³² Th, ²³³ U	Térmico	LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄
MSFR	²³² Th, ²³³ U	Rápido	LiF- ThF ₄ - UF ₄
TMSR	²³² Th, ²³³ U	Térmico	LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄
MSR-FUJI	²³² Th, ²³³ U	Térmico	LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄

La temperatura de fusión es clave a la hora de elegir el combustible y el refrigerante. Un punto de fusión bajo reduce el riesgo de congelación y el riesgo de precipitados sólidos y que reduce la velocidad de corrosión del material estructural. La sal debe disolver suficiente material fisionable a la temperatura de operación para que sea crítica. Una alta capacidad calorífica tiene la ventaja de almacenar más energía, reduciendo la cantidad de sal del circuito de refrigeración (Capelli, 2012).

El BeF₂ tiene una sección transversal de captura de neutrones muy baja y junto con el LiF es el solvente para ThF₄, el UF₄ es utilizado para iniciar la reacción, y ThF₄ es el material fértil. El Berilio es un material que aumenta la eficiencia en la transferencia de calor, no afecta a la población de neutrones presente en el núcleo, el Litio captura neutrones de manera efectiva (Capelli et al., 2014). En la [Tabla 2](#) se muestran las secciones eficaces de los elementos que compone la sal combustible y se observa que el litio tiene la mayor sección eficaz de absorción tanto microscópica como también macroscópica.

Tabla 2. Secciones eficaces (Duderstadt et al 1976)

Elemento	Microscópica			Macroscópica		
	b			cm ⁻¹		
	Absorción	Dispersión	Total	Absorción	Dispersión	Total
	σ_a	σ_s	σ_t	Σ_a	Σ_s	Σ_t
Li	71	1.4	72.4	3.29	0.065	3.35
Be	0.010	7.0	7.01	124 ^{tt}	0.865	0.865
F	0.001	3.9	3.9	0.01	20 ^t	20 ^t
Th	7.56	12.6	20.2	0.222	0.369	0.592
U	7.68	8.3	16.0	0.367	0.397	0.765

^t Los valores se han multiplicado por 10⁵

^{tt} Moléculas/cm³

4.4 Torio (Th)

El torio (Th-232) es un material fértil que al absorber un neutrón y liberar 2 electrones (radiación beta) transmuta a uranio-233 (U-233) que es un excelente material fisionable que puede sostener una reacción en cadena en un reactor nuclear, en la [Figura 5](#) se muestra el decaimiento del torio. ([Jamison 2014](#)).

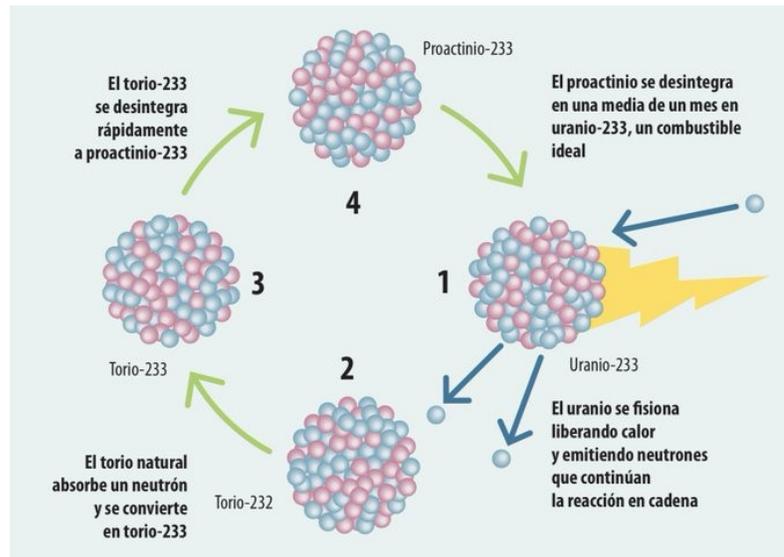
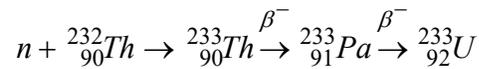
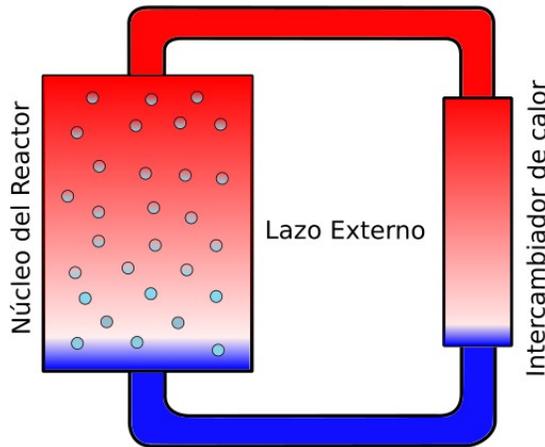


Figura 5. Decaimiento del Torio

5. Metodología

El núcleo de un reactor nuclear de sal fundida se puede representar esquemáticamente como un cilindro vertical [Figura 6](#).



[Figura 6](#). Diagrama esquemático del modelo de un reactor nuclear de sal fundida

El flujo burbuja se caracteriza por tener burbujas de gas dispersas en el líquido, las cuales se mueven hacia la parte superior del núcleo aproximadamente a la misma velocidad del líquido. La serie de patrones de flujo existente en el flujo ascendente es diferente a la presente en el flujo descendente. En ambas direcciones, los patrones de flujo presentan un eje de simetría, el cual coincide con el del núcleo, pues el efecto de la fuerza de gravedad actúa sobre este eje, la fuerza gravitacional (conocidas como efectos de flotación) se opone a las fuerzas dinámicas.

Para estudiar los procesos de generación de potencia por fisiones nucleares, transferencia de calor en el núcleo del reactor y en lazo externo. Se propone desarrollar el estudio siguiendo la siguiente metodología basada en el modelado matemático de los procesos y el diagrama esquemático de la [Figura 6](#):

- Modelado de los procesos neutrónicos (dentro y fuera del núcleo)

La sal fundida es un combustible nuclear líquido, circula a través del núcleo del reactor y es moderado con grafito. El combustible cuando sale del núcleo y pasa al lazo externo, no puede generar potencia porque no cumple las condiciones de criticidad. No obstante, durante el proceso los neutrones retardados (generados después de la fisión) decaen también en el lazo externo, y tienen un efecto crucial para mantener criticidad en el núcleo del reactor. Como el proceso de fisión es prácticamente instantáneo (del orden de microsegundos o hasta menos), el efecto del viaje de la sal fundida dentro del núcleo es despreciable. No obstante, la concentración de neutrones retardados tiene un efecto relevante durante el viaje de la sal fundida en el núcleo y en lazo externo, los efectos convectivos en la concentración de precursores es un efecto que debe considerarse.

- Modelado de los procesos de transferencia de calor en el combustible líquido

La sal fundida, que constituye el combustible nuclear, genera calor debido a la fisión, éste eleva su temperatura y existe una transferencia de calor hacia las burbujas de helio. Para considerar, la temperatura de cada una de las fases, se utiliza un modelo escalado de transferencia de calor de flujos separados, porque aplica una ecuación de balance para fase líquida y otra para la fase gaseosa. Estas ecuaciones escaladas, incorporan efectos de transferencia de calor entre las fases, a través de la interfaz gas-líquido.

- Procesos de flujo en dos fases

La densidad de la sal fundida y de las burbujas es diferente, por lo que sus velocidades deben ser distintas para las condiciones de flujo en el núcleo. Para determinar la velocidad relativa entre ellas, se aplica el modelo de flujos relativos de [Zuber and Findlay \(1963\)](#). La fracción volumen de la fase gas se obtiene del balance de masa de la fase gas y el modelo de flujos relativos. Las velocidades de cada una de las fases, son importantes para calcular los efectos convectivos de la transferencia de calor, y para estimar la caída de presión del núcleo.

- Acoplamiento

Como parte de la metodología, el acoplamiento es crucial, porque es donde se integran las variables de interacción entre los procesos de generación de potencia de los procesos neutrónicos y termohidráulica de la transferencia de calor y el flujo de fluidos en flujo en dos fases. Los procesos neutrónicos interactúan con la temperatura del combustible y velocidad de las fases, para determinar dicha temperatura es necesario la fuente de calor nuclear por unidad de volumen, y para determinar las temperaturas de la fase gas y líquida se requieren las velocidades de cada una de las fases, además de la fracción volumen. Como se puede observar es un sistema altamente acoplado.

- Esquema numérico de solución

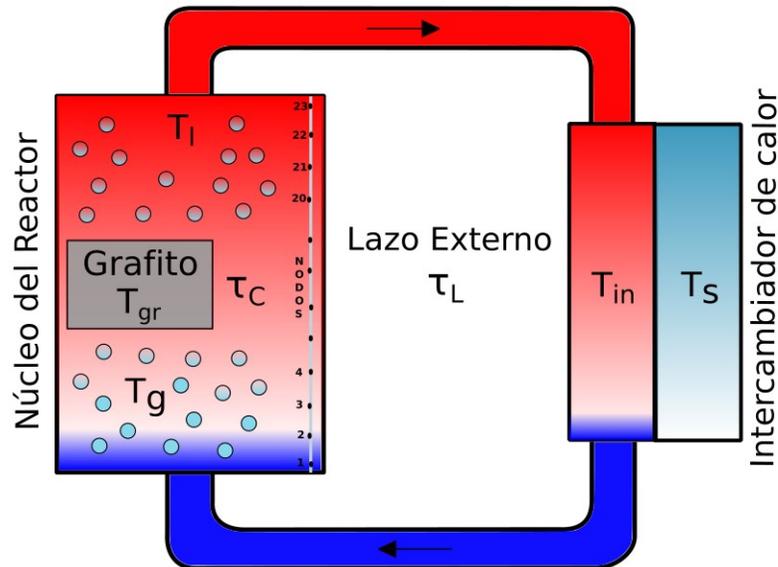
Para el modelo de flujos separados para las temperaturas de las fases gas y líquida, se aplican el método de direcciones alternantes que lo constituyen dos matrices tridiagonales. En el modelo de la densidad neutrónica y el de flujo de fluidos se aplica el método de Euler en forma explícita.

- Implementación y simulaciones

Los modelos numéricos se implementaron y programaron en el software Matlab, se realizaron experimentos numéricos para analizar el comportamiento dinámico del núcleo del reactor MSR

6. Generación de potencia

En la [Figura 7](#) se muestra el diagrama esquemático de un reactor nuclear de sal fundida que usa como moderador el grafito, que tiene tiempos de circulación del combustible líquido en el núcleo del reactor nuclear y en el lazo externo que tiene relación con el intercambiador de calor.



[Figura 7](#). Diagrama esquemático del modelo de cinética neutrónica en un reactor nuclear de sal fundida

La generación de potencia en un reactor nuclear de sal fundida en función del tiempo y el espacio $P(t)$, se puede representar en términos de la densidad neutrónica $n(t)$, la potencia nominal P_0 :

$$P(t) = P_0 n(t) \quad (6.1)$$

La densidad neutrónica en el reactor en función del tiempo, que tiene relación con la producción de neutrones rápidos y la tasa de neutrones retardados está dada por ([Duderstadt and Hamilton, 1976](#)):

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho_{net}(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \lambda c \quad (6.2)$$

La concentración de precursores en el núcleo en función del tiempo considera efectos de producción, decaimiento y transporte por efectos convectivos (Zarei, 2017)

:

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \lambda c(t) - \frac{c(t)}{\tau_C} + \frac{c(t - \tau_L)}{\tau_C} e^{(-\lambda \tau_L)} \quad (6.3)$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = \dot{C}_S - \dot{C}_D - \dot{C}_O + \dot{C}_I$$

donde

\dot{C}_S : Tasa de formación en el núcleo.

\dot{C}_D : Tasa de decaimiento en el núcleo.

\dot{C}_O : Tasa de precursores dejando el núcleo.

\dot{C}_I : Tasa de reingreso de precursores que abandonaron el núcleo τ_L segundos atrás y decaen a una fracción $e^{(-\lambda \tau_L)}$ de su valor anterior.

Los términos τ_C y τ_L son tiempos de circulación del combustible en el núcleo del reactor nuclear y en el lazo externo respectivamente. El término \dot{C}_O tiene un término que está dividido por τ_C , éste se indetermina si τ_C es igual a cero, por lo que τ_C debe estar entre el intervalo $(0, \infty)$. Mientras que el término \dot{C}_I se vuelve cero si τ_L es muy grande tendiendo a infinito o τ_C es igual a cero, por lo que τ_L debe estar esta entre el intervalo $[t, \infty)$.

Al ser los términos \dot{C}_I y \dot{C}_O cero se tendría el modelo de concentración de precursores puntual de un reactor nuclear convencional.

El cambio temporal de la temperatura del grafito existe una transferencia de calor entre el combustible líquido y el grafito:

$$\frac{dT_{gr}(t)}{dt} = \frac{K_{fgr}}{m_{gr}Cp_{gr}} (\langle T_l \rangle - T_{gr}(t)) + \frac{\gamma_g}{m_{gr}Cp_{gr}} P_0 n(t) \quad (6.4)$$

La temperatura en el intercambiador de calor está dada por:

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{\langle w_l \rangle}{m_h} (\langle T_l \rangle - T_{in}(t)) + \frac{k_{hs}}{m_h Cp_l} (T_s - T_{in}(t)) \quad (6.5)$$

donde

$$\langle T_l \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N T_l}{N}, \quad \langle T_g \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N T_g}{N}, \quad \langle \varepsilon_g \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_g}{N} \quad \text{y} \quad \langle w_l \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N w_l}{N}$$

estos valores promedio sobre todo el volumen se obtienen del modelo de flujo en dos fases en estado estacionario mostrado en el capítulo 8.

La reactividad en el reactor está dada por la [Ecuación \(6.6\)](#):

$$\rho_{net}(t) = \rho_{ext}(t) + \rho_{th}(t) \quad (6.6)$$

La reactividad de retroalimentación térmica está dada por:

$$\rho_{th}(t) = \alpha_f (\langle T_l \rangle - T_{l0}) + \alpha_{gr} (T_{gr}(t) - T_{gr0}) \quad (6.7)$$

La temperatura de referencia, se obtiene de las condiciones nominales del reactor.

La reactividad externa, está dada por:

$$\rho_{ext}(t) = \frac{\Lambda}{P(t)} \left[- \left(\lambda c + \frac{P}{\Lambda} (\rho_{th}(t) + \rho_0 - \beta) \right) + \dot{P}_{ref} + k (P_{ref} - P(t)) \right] \quad (6.12)$$

Para calcular la temperatura del combustible líquido en flujo en dos fases se requiere la potencia volumétrica la cual se calcula de la siguiente manera:

$$q''' = \frac{P_0 n(t) \varphi(z)}{V} \quad (6.13)$$

7. Modelo unidimensional de flujo relativo

El modelo de flujo relativo es una forma simplificada del modelo de dos flujos que se utiliza para el análisis de sistemas termohidráulicos. Este modelo y su teoría permiten obtener parámetros únicos que representan las características interfaciales entre fases

Balance de masa en la fase gas

$$\frac{\partial \varepsilon_g \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_g \rho_g \nu_g}{\partial z} = 0 \quad (7.1)$$

Expandiendo términos, se obtiene:

$$\rho_g \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + \rho_g \nu_g \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial z} = -f(\varepsilon_g) \quad (7.2)$$

donde

$$f(\varepsilon_g) = \varepsilon_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \varepsilon_g \nu_g \frac{\partial \rho_g}{\partial z} + \varepsilon_g \rho_g \frac{\partial \nu_g}{\partial z} \quad (7.3)$$

El reactor opera a presión atmosférica, entonces $\rho_g = \rho_g(T_g)$

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_g} \right) \frac{\partial T_g}{\partial t} \quad (7.4)$$

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial z} = \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_g} \right) \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (7.5)$$

Sustituyendo (7.4) y (7.5) en (7.3),

$$f(\varepsilon_g) = \varepsilon_g \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_g} \right) \frac{\partial T_g}{\partial t} + \varepsilon_g \nu_g \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_g} \right) \frac{\partial T_g}{\partial z} + \varepsilon_g \rho_g \frac{\partial \nu_g}{\partial z} \quad (7.6)$$

La derivada de la temperatura del gas y temperaturas respecto al tiempo se obtiene del modelo de dos fluidos que se presenta más adelante.

La fracción de vacío ε_g representa la relación volumétrica de la fase gaseosa en el flujo en dos fases, y en este trabajo se obtiene aplicando la teoría de flujo relativos ([Apéndice A](#)).

$$\varepsilon_g = \frac{j_g}{C_0(j_g + j_l) + v_{gj}} \quad (7.7)$$

donde

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (7.8)$$

$$v_{gj} = \sqrt{2} \left(\frac{g \sigma (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right)^{0.25} \quad (7.9)$$

Es importante mencionar que la velocidad superficial del gas j_g y de la fase líquida j_l , son las condiciones de entrada en el reactor, C_0 y v_{gj} se conocen como parámetros de flujos relativos.

La velocidad superficial del gas j_g es igual al producto de la velocidad promedio por la fracción vacío.

$$j_g = v_g \varepsilon_g \quad (7.10)$$

En forma análoga, velocidad superficial del líquido j_l está dada por con v_l es la velocidad promedio intrínseco del líquido por la fracción líquido.

$$j_l = v_l \varepsilon_l = v_l (1 - \varepsilon_g) \quad (7.11)$$

El flux volumétrico de la mezcla es la suma de la velocidad superficial del gas más la velocidad superficial del líquido.

$$j = j_g + j_l = \frac{w_g}{A_{x-s} \rho_g} + \frac{w_l}{A_{x-s} \rho_l} \quad (7.12)$$

7.1 Fracción vacío

Para el cálculo de flujo en dos fases se usa la fracción vacío, que es la relación entre el volumen de la burbuja y el volumen de la celda unitaria (Jiménez-Balbuena 2021).

El diámetro de la burbuja es:

$$d_b = 0.0024m$$

Con ese dato de calcula el volumen de la burbuja

$$V_b = \frac{4}{3}r^3 = \frac{4}{3}(0.0012m)^3 = 7.23273 \times 10^{-9} m^3 \quad (7.13)$$

A partir del volumen de una celda unitaria de $V = 1.08005 \times 10^{-6} m^3$, obtiene la fracción vacío.

$$\varepsilon_g = \frac{V_b}{V} = \frac{7.23273 \times 10^{-9} m^3}{1.08005 \times 10^{-6} m^3} = 0.006696 \quad (7.14)$$

La fracción vacío es el valor en condiciones nominales de operación del reactor.

$$\varepsilon_g = 0.67\% \text{ (Cervi et al., 2019)}$$

Las burbujas presentes en el núcleo del reactor son debido al sistema de inyección de burbujas, las burbujas de gas están dispersas en el fluido combustible y distribuidas uniformemente en la sección transversal del núcleo del reactor.

La distribución de la fracción vacío se presenta en la dirección vertical porque es en la dirección en que se mueve el flujo, para el caso de las burbujas la fracción podría aumentar como consecuencia de un cambio de volumen en las mismas debido al aumento de temperatura (expansión térmica), en el caso de la fase líquida la fracción líquido disminuye a causa de una mayor cantidad de gas en el núcleo.

7.2 Velocidad de arrastre y parámetro de distribución

Se compara la velocidad de arrastre y el parámetro de distribución entre un reactor de sal fundida, un reactor enfriado por un metal líquido y aire-agua, usando una fracción vacío de $\varepsilon_g = 0.0067$, y sus propiedades fisicoquímicas. Se muestran los resultados en la [Tabla 3](#):

- Reactor de sal fundida usando Helio burbujeante y $LiF - ThF_4 - U^{233}F_4$

$$\rho_l = 4125 \text{ kg} / \text{m}^3; \rho_{gHe} = 0.104 \text{ kg} / \text{m}^3; \sigma_l = 0.2 \text{ N} / \text{m}$$

- Reactor nuclear enfriado por un metal líquido (Sodio)² y gas nitrógeno

$$\rho_{lNa} = 898 \text{ kg} / \text{m}^3; \rho_{gN} = 1.2506 \text{ kg} / \text{m}^3; \sigma_{Na} = 0.21 \text{ N} / \text{m}$$

- Aire-agua.

$$\rho_{lH_2O} = 997 \text{ kg} / \text{m}^3; \rho_{g\text{aire}} = 1.225 \text{ kg} / \text{m}^3; \sigma_{H_2O} = 72.8 \times 10^{-3} \text{ N} / \text{m}$$

[Tabla 3](#). Comparación de la velocidad de arrastre y el parámetro de distribución

Parámetro	Reactor nuclear de sal fundida (Helio y $LiF - ThF_4 - U^{233}F_4$)	Reactor nuclear de metal líquido (Sodio y Nitrógeno)	Aire-Agua
v_{gj} [m/s]	0.2088	0.3093	0.2312
C_0 [-]	1.199	1.19254	1.19299

Se llega a que la velocidad de arrastre y el parámetro de distribución de un reactor nuclear de sal fundida es muy parecida a la del aire-agua.

7.3 Caída de presión en el núcleo

La caída de presión esta expresado en el balance de la [Ecuación 7.15](#), la cual está constituida por la caída de presión por aceleración espacial la caída de presión por fricción y la caída de presión por gravedad.

Ecuación de balance de cantidad de movimiento

$$\frac{L}{A_{x-s}} \frac{dw}{dt} = \Delta P + \sum_z (\Delta P_{az} + \Delta P_{fz} + \Delta P_{gz}) \quad (7.15)$$

La caída de presión por aceleración espacial

$$\Delta P_{az} = \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right)_z - \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right)_{z+\Delta z} \quad (7.16)$$

La caída de presión por fricción

$$\Delta P_{fz} = - \frac{\phi_{f0}^2 C_{f0} G_m^2 \Delta z}{D_h \rho_l} \quad (7.17)$$

La caída de presión por gravedad

$$\Delta P_{gz} = -g \rho_m \Delta z \quad (7.18)$$

$$G_m = \left(\frac{w_g}{A_{x-s}} + \frac{w_l}{A_{x-s}} \right) \quad (7.19)$$

$$\phi_{f0}^2 = 1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \quad (7.20)$$

$$\rho_m = \rho_g \varepsilon_g + \rho_l \varepsilon_l \quad (7.21)$$

$$x = \frac{j_g \rho_g}{j \rho_m} \quad (7.22)$$

Los flujos másicos están dados por el producto de la velocidad superficial con el área transversal y la densidad, del gas y del líquido respectivamente.

$$w_g = j_g A_{x-s} \rho_g = \varepsilon_g v_g A_{x-s} \rho_g \quad (7.23)$$

$$w_l = j_l A_{x-s} \rho_l = \varepsilon_l v_l A_{x-s} \rho_l \quad (7.24)$$

En estado estacionario se tiene la caída de presión total.

$$\Delta P = P_{z+\Delta z} - P_z = \left[\left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right)_z - \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right)_{z+\Delta z} \right] - \frac{\phi_{f0}^2 C_{f0} G_m^2 \Delta z}{D_h \rho_l} - g \rho_m \Delta z \quad (7.25)$$

8. Modelo de transferencia de calor del flujo en dos fases

Como se expresó anteriormente el núcleo del reactor tiene forma cilíndrica, por lo que se usan coordenadas cilíndricas. El desarrollo parte del trabajo de [Jiménez-Balbuena \(2021\)](#) donde se encuentra con mayor detalle la siguiente información.

Para el *combustible líquido* se tiene el modelo siguiente:

$$\begin{aligned} \varepsilon_l(\rho Cp)_l \frac{\partial \langle T_l \rangle^l}{\partial t} - (\rho Cp)_l \langle T_l \rangle^l \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + (\rho Cp)_l \nabla \cdot (\varepsilon_l \langle \mathbf{v}_l \rangle^l \langle T_l \rangle^l) + k_l (\nabla \varepsilon_l) \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l = \\ \nabla \cdot [\mathbf{K}_{ll} \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l + \mathbf{K}_{lg} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g] + \mathbf{u}_{ll} \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l + \mathbf{u}_{lg} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g - a_v h (\langle T_l \rangle^l - \langle T_g \rangle^g) + \varepsilon_l \langle q_l'' \rangle^l \end{aligned} \quad (8.1)$$

Para el *gas* se tiene:

$$\begin{aligned} (\rho Cp)_g \varepsilon_g \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial t} - (\rho Cp)_g \langle T_g \rangle^g \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + (\rho Cp)_g \varepsilon_g \nabla \cdot (\langle \mathbf{v}_g \rangle^g \langle T_g \rangle^g) + k_g (\nabla \varepsilon_g) \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g \\ = \nabla \cdot [\mathbf{K}_{gg} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g + \mathbf{K}_{gl} \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l] + \mathbf{u}_{gg} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g + \mathbf{u}_{gl} \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l - a_v h (\langle T_g \rangle^g - \langle T_l \rangle^l) \end{aligned} \quad (8.2)$$

El coeficiente efectivo \mathbf{K}_{ll} disminuir al aumentar la cantidad de burbujas en el núcleo, lo que significa existe resistencia a la transferencia de calor en la sal conforme disminuye.

$$\mathbf{K}_{ll} = k_l \left(\varepsilon_l \mathbf{I} + \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{lg} \mathbf{b}_{ll} dA \right) - (\rho Cp)_l \langle \tilde{\mathbf{v}}_l \mathbf{b}_{ll} \rangle \quad (8.3)$$

El coeficiente efectivo \mathbf{K}_{gg} , aumenta e interpreta como una mayor capacidad de la fase gas para transferir calor, siempre que esta esté presente en mayor cantidad.

$$\mathbf{K}_{gg} = k_g \left(\varepsilon_g \mathbf{I} + \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{gl} \mathbf{b}_{gg} dA \right) \quad (8.4)$$

Coefficientes efectivos de términos cruzados

$$\mathbf{K}_{lg} = \frac{k_l}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{lg} \mathbf{b}_{lg} dA - (\rho Cp)_l \langle \tilde{\mathbf{v}}_l \mathbf{b}_{lg} \rangle \quad (8.5)$$

$$\mathbf{K}_{gl} = \frac{k_g}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{gl} \mathbf{b}_{gl} dA \quad (8.6)$$

Los coeficientes efectivos \mathbf{u}_{ll} y \mathbf{u}_{lg} representan los efectos convectivos, ya que ambos están en función de las desviaciones de la velocidad del líquido, mientras que \mathbf{u}_{gg} y \mathbf{u}_{gl} solo dependen de las variables de cierre.

$$\mathbf{u}_{ll} = (\rho Cp)_l \langle \tilde{\mathbf{v}}_l s_l \rangle + k_l \left(\frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{lg} \cdot \nabla \mathbf{b}_{ll} dA - \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{lg} s_l dA \right) \quad (8.7)$$

$$\mathbf{u}_{gg} = k_g \left(\frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{gl} \cdot \nabla \mathbf{b}_{gg} dA + \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{gl} s_g dA \right) \quad (8.8)$$

Términos cruzados

$$\mathbf{u}_{lg} = k_l \left(\frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{lg} \cdot \nabla \mathbf{b}_{lg} dA + \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{lg} s_l dA \right) - (\rho Cp)_l (\langle \tilde{\mathbf{v}}_l s_l \rangle) \quad (8.9)$$

$$\mathbf{u}_{gl} = k_g \left(\frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{gl} \cdot \nabla \mathbf{b}_{gl} dA - \frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{gl} s_g dA \right) \quad (8.10)$$

El coeficiente efectivo $a_{v,h}$ representa la transferencia de calor interfacial

$$a_{v,h} = k_g \left(\frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{gl} \cdot \nabla s_g dA \right) = -k_l \left(\frac{1}{V} \int_{A_{lg}} \mathbf{n}_{lg} \cdot \nabla s_l dA \right) \quad (8.11)$$

En promedio el combustible líquido y el gas se mueve en el eje vertical por lo que se usa un modelo unidimensional en la dirección z, se presenta el desarrollo de las ecuaciones en el [Apéndice B](#) y [Apéndice C](#).

Para el líquido:

$$\begin{aligned}
 (\rho Cp)_l \varepsilon_l \frac{\partial \langle T_l \rangle^l}{\partial t} - (\rho Cp)_l \langle T_l \rangle^l \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + (\rho Cp)_l \frac{\partial (\varepsilon_l v_{lz} \langle T_l \rangle^l)}{\partial z} + k_l \left(\frac{\partial \varepsilon_l}{\partial z} \frac{\partial \langle T_l \rangle^l}{\partial z} \right) = \\
 \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{llzz} \frac{\partial \langle T_l \rangle^l}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{lgzz} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) + u_{llzz} \frac{\partial \langle T_l \rangle^l}{\partial z} + u_{lgzz} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} - a_v h (\langle T_l \rangle^l - \langle T_g \rangle^g) + \varepsilon_l \langle q_l^m \rangle^l
 \end{aligned} \tag{8.12}$$

Para el gas:

$$\begin{aligned}
 (\rho Cp)_g \varepsilon_g \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial t} - (\rho Cp)_g \langle T_g \rangle^g \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + (\rho Cp)_g \varepsilon_g \frac{\partial v_{gz} \langle T_g \rangle^g}{\partial z} + k_g \left(\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial z} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) = \\
 \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{ggzz} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{glzz} \frac{\partial \langle T_l \rangle^l}{\partial z} \right) + u_{ggzz} \left(\frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) + u_{glzz} \left(\frac{\partial \langle T_l \rangle^l}{\partial z} \right) - \\
 a_v h (\langle T_g \rangle^g - \langle T_l \rangle^l)
 \end{aligned} \tag{8.13}$$

Se usara el siguiente cambio de nomenclatura para los promedios intrínsecos $\langle T_g \rangle^g \rightarrow T_g$ y $\langle T_l \rangle^l \rightarrow T_l$ para simplificar las ecuaciones de los próximos capítulos.

8.1 Coeficientes efectivos

En el trabajo de tesis de maestría de Jiménez-Balbuena (2021), explica que los coeficientes efectivos representan una conexión entre la macroescala y la microescala de un medio efectivo y hacen posible la solución del modelo escalado. El valor numérico de cada coeficiente lo obtiene mediante el software COMSOL. El valor numérico de cada coeficiente efectivo lo evalúa considerando una diferencia en uno de los parámetros de operación, la fracción de gas presente en el núcleo, donde analiza el comportamiento de cada uno de ellos, las fracciones que utiliza para evaluar la fracción de gas en condiciones normales de operación del reactor corresponde a 0.0067.

Explica que en condiciones nominales de operación el combustible está presente en un 99.33% y \mathbf{K}_{ll} es prácticamente igual a la conductividad del líquido, mientras que las burbujas de helio están presentes solo un 0.067% provocando que \mathbf{K}_{gg} sea próxima a la conductividad del gas. Y que los coeficientes efectivos para la componente zz el valor de \mathbf{K}_{ll} disminuya al aumentar la cantidad de burbujas en el núcleo, mientras que \mathbf{K}_{gg} muestra un comportamiento totalmente opuesto, aumenta aproximándose a la conductividad del helio. Dicho comportamiento en el componente zz de ambos coeficientes se asocia al hecho de que haya una mayor o menor presencia de sal o helio en el núcleo.

Encontró que existe un decremento en el coeficiente \mathbf{K}_{ll} al aumentar la fracción de gas, que hay una mayor resistencia a la transferencia de calor en la sal. El aumento de \mathbf{K}_{gg} se interpreta como una mayor capacidad de la fase gas para transferir calor. \mathbf{K}_{gl} contribuyen al modelo escalado mediante efectos de transferencia de calor interfacial. Pero solo \mathbf{K}_{lg} considera los efectos hidrodinámicos debido al movimiento de la sal alrededor de las burbujas.

Explica que una parte de los efectos convectivos se pueden definir con los coeficientes efectivos \mathbf{u}_{ll} y \mathbf{u}_{lg} involucran efectos de transferencia de calor interfacial e hidrodinámicos, a diferencia de \mathbf{u}_{gg} y \mathbf{u}_{gl} que solo dependen de las variables de cierre. El coeficiente efectivo de transferencia de calor interfacial $a_v h$ presenta ordenes de magnitud de entre 10^2 y 10^6 ($\text{W}/\text{m}^3\text{W}$).

En la [Figura 8](#) y en la [Tabla 4](#) se muestran los valores de los coeficientes efectivos para diferentes fracciones vacío ([Jiménez-Balbuena, 2021](#)).

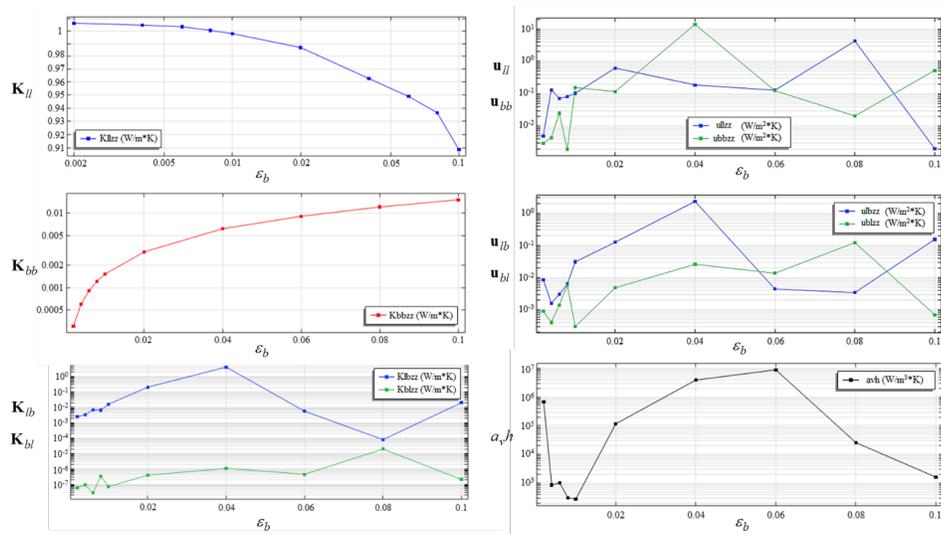


Figura 8. Componente z de los Coeficientes Efectivos.

Tabla 4. Coeficientes Efectivos de una fracción vacío de 0.002, 0.0067 y 0.1 en la componente z.

ε_g	K_{ll} [W/mK]	K_{gg} [W/mK]	K_{lg} [W/mK]	K_{gl} [W/mK]
0.002	1.0065	3.0399×10^{-4}	2.51×10^{-3}	5.9761×10^{-8}
0.0067	1.0016	1.02×10^{-3}	1.614×10^{-2}	5.5894×10^{-9}
0.1	0.9088	1.52×10^{-2}	2.008×10^{-5}	2.0739×10^{-7}

ε_g	u_{ll} [W/m ² K]	u_{gg} [W/m ² K]	u_{lg} [W/m ² K]	u_{gl} [W/m ² K]	$a_v h$ [W/m ³ K]
0.002	0.005	0.003	0.0086	0.0009	6.6876×10^5
0.0067	0.1263	0.0129	0.0022	0.001	1.5985×10^3
0.1	0.002	0.5286	0.1530	0.0007	1.6085×10^3

8.2 Procedimiento de solución

Las pruebas integradas sin incluir los modelos de los procesos neutrónicos o de generación de potencia, se llevaron a cabo aplicando el siguiente procedimiento.

1. Cálculo de la velocidad de arrastre y el parámetro de distribución con la densidad del gas y del líquido usando la temperatura de entrada respectivamente.
2. Se proponen la velocidad superficial del líquido y del gas con las cuales se obtiene un valor aproximado de fracción vacío de entrada de 0.0067, es el valor en condiciones nominales de operación del reactor. Sumando estas velocidades para obtener la velocidad superficial total.
3. Se calcula la velocidad promedio local del gas usando la velocidad de arrastre, el parámetro de distribución y la velocidad superficial total, para calcular la velocidad del líquido se obtiene con la velocidad superficial del líquido y la fracción líquido. Y para obtener la velocidad relativa se calcula con la diferencia de la velocidad del gas con la del líquido.
4. Para calcular la fracción vacío se usa la velocidad superficial del gas y la total, la velocidad de arrastre y el parámetro de distribución, y para la fracción líquido se usa la fracción vacío y se le resta a la unidad.
5. Para el cálculo del flujo másico del gas se usa la fracción líquido por la densidad del líquido y el área de transversal. Y para el flujo másico del líquido se obtiene con la resta del flujo másico total con el flujo másico del gas. Y por último el flujo másico total se obtiene con la suma del flujo másico del gas más el flujo másico del líquido.

Todo esto se repite cambiando la forma en que se calcula la fracción vacío, ahora usando el balance de masa, los demás cálculos quedan igual y esto se hace hasta alcanzar el número de nodos usados en el núcleo del reactor nuclear de sal fundida. Para calcular las temperaturas del gas y del líquido en cada nodo, se resuelve una matriz tridiagonal con el método de Thomas, calculando cada nodo de temperatura para el líquido y el gas de forma independiente y posteriormente se ajusta ejecutando el modelo de forma iterativa.

8.3 Datos de diseño y parámetros

En la [Tabla 5](#) se muestra la altura y el radio del núcleo del reactor de sal fundida.

[Tabla 5.](#) Parámetros geométricos del MSFR

Parámetros	Valor
Altura L [m]	2.25
Radio R [m]	2.25

En la [Tabla 6](#) se muestra los parámetros de operación, teniendo una temperatura de entrada al núcleo para el combustible líquido y para el gas helio de 923.15,

[Tabla 6.](#) Parámetros de operación del MSFR ([Jiménez-Balbuena, 2021](#))

Parámetros Nominales	Valor
Potencia Térmica/Potencia Eléctrica $P_{T/E}$ [MW]	3000 / 1500
Temperatura de entrada al núcleo T [K]	923.15
Temperatura de salida del núcleo T [K]	1023.15
Volumen del núcleo del reactor V_C [m ³]	18
Presión P [kPa]	200 00

En la [Tabla 7](#) se muestra la velocidad superficial del líquido y del gas como parámetros de entrada al núcleo del reactor, la potencia volumétrica ([Apéndice F](#)).

[Tabla 7.](#) Condiciones entrada

Parámetro	Valor
Velocidad superficial del gas j_g [m/s]	0.02607
Velocidad superficial del líquido j_l [m/s]	3.03961
Potencia volumétrica q'''_{\max} [MWm ⁻³]	1409.72
Volumen activo V [m ³]	0.174989

Parámetros de la cinética neutrónica se muestra en la [Tabla 8](#).

Tabla 8. Cinética neutrónica

Parámetro	Valor
Fracción efectiva de neutrones retardados $\beta[-]$	240×10^{-5}
Tiempo de generación de neutrones $\Lambda[s]$	3.6×10^{-4}
Constante de decaimiento $\lambda [s^{-1}]$	5×10^{-2}

En la [Tabla 9](#) se muestran las propiedades fisicoquímicas de combustible líquido y del gas helio que dependen de la temperatura, el comportamiento se encuentra en al [Apéndice D](#).

Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas del $LiF-ThF_4-^{233}UF_4$ y de las burbujas de helio dependientes de la temperatura.

Propiedad	$LiF-ThF_4-^{233}UF_4$	Gas (helio)
Densidad $\rho[kg/m^3]$	$4096 - 0.882(T_l - 1008)$	$\frac{4.0026Ps}{8.3145T_g}$
Calor Especifico $Cp[J/kgK]$	$-1111 + 2.78T_l$	5192.6

En la [Tabla 10](#) se muestra otros parámetros usados como la tensión superficial, la longitud del nodo, la aceleración de la gravedad y el factor de fracción de fase simple.

Tabla 10. Otros parámetros

Parámetro	valor
Factor de fracción de fase simple $C_{f0}[-]$	0.005
Tensión superficial del combustible líquido $\sigma[N/m]$	0.2
Longitud del nodo $\Delta z[m]$	0.1125
Aceleración de la gravedad $g[m/s^2]$	9.81

9. Implementación

El código generado a partir de las ecuaciones se implementó en el Software Matlab que es una plataforma de programación y cálculo numérico, en este sistema de cómputo numérico usa un lenguaje de programación propio llamado “lenguaje M” en un entorno de desarrollo integrado.

En forma discreta el balance de masa para obtener la fracción vacío:

$$\rho_{gi}^t \frac{\varepsilon_{g(i)}^{t+\Delta t} - \varepsilon_{g(i)}^t}{\Delta t} + (\rho_g \nu_g)_i^t \frac{\varepsilon_{g(i+1)}^t - \varepsilon_{g(i)}^t}{\Delta z} = -f(\varepsilon_g)_i^t \quad (9.1)$$

Despejando se obtiene:

$$\varepsilon_{g(i+1)}^t = \varepsilon_{g(i)}^t - \left(\frac{\Delta z}{(\rho_g \nu_g)_i^t} \right) f(\varepsilon_g)_i^t \quad (9.2)$$

donde

$$f(\varepsilon_g)_i^t = \varepsilon_{gi}^t \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_g} \right)_i^t \left(\frac{dT_g}{dt} \right)^t + (\varepsilon_g \nu_g)_i^t \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_g} \right)_i^t \frac{T_{g(i+1)}^t - T_{g(i)}^t}{\Delta z} + (\varepsilon_g \rho_g)_i^t \frac{\nu_{g(i+1)}^t - \nu_{g(i)}^t}{\Delta z} \quad (9.3)$$

Se calculan para cada nodo las propiedades del líquido y del gas

$$\rho_{li} [\text{kg/m}^3] = 4096 - 0.882(T_{li} - 1008) \quad (9.4)$$

$$Cp_{li} [\text{J/kgK}] = -1111 + 2.78T_{li} \quad (9.5)$$

$$\rho_{gi} [\text{kg/m}^3] = \frac{4.0026 P_{si}}{8.3145 T_{gi}} \quad (9.6)$$

$$Cp_{gi} [\text{J/kgK}] = 5192.6 \quad (9.7)$$

La condición inicial $\varepsilon_{g(i)}^t$, se obtiene aplicando la teoría de flujo en dos fases.

$$\varepsilon_{gi} = j_{gi} / (C_{0i} j_i + \nu_{gji}) \quad (9.8)$$

$$\nu_{gji} = \sqrt{2} \left(\frac{g \sigma (\rho_{li} - \rho_{gi})}{\rho_{li}^2} \right)^{0.25} \quad (9.10)$$

$$C_{0i} = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_{gi}}{\rho_{li}}} \quad (9.11)$$

Para la fracción de líquido se usa

$$\varepsilon_{li} = 1 - \varepsilon_{gi} \quad (9.12)$$

Para iniciar se usaron los siguientes valores de la velocidad superficial.

$$j_g = 0.02607$$

$$j_l = 3.03961$$

La suma de las velocidades superficiales del gas y del líquido de be ser constante.

$$j_i = j_{gi} + j_{li} \quad (9.13)$$

Seguido se calculan las velocidades promedio locales intrínsecas para el líquido y el gas.

$$v_{gi} = C_{0i} j_i + v_{gji} \quad (9.14)$$

$$v_{li} = j_{li} / \varepsilon_{li} \quad (9.15)$$

Restando la del gas con la del líquido se obtiene la velocidad relativa.

$$v_{ri} = v_{gi} - v_{li} \quad (9.16)$$

Para calcular la caída de presión se requieren los flujos máxicos del gas y del líquido

$$w_{gi} = j_{gi} A_{x-s} \rho_{gi} \quad (9.17)$$

$$w_{li} = j_{li} A_{x-s} \rho_{li} \quad (9.18)$$

A partir del nodo dos se usan las siguientes ecuaciones donde se calcula la velocidad superficial del gas y de líquido y la fracción vacío con del balance de masa.

$$j_{gi} = \varepsilon_{gi} (C_{0i} j_i + v_{gji}) \quad (9.19)$$

$$j_{i+1} = j_i \quad (9.20)$$

$$j_{li} = j_i - j_{gi} \quad (9.21)$$

$$\varepsilon_{gi+1} = \varepsilon_{gi} + \left(\frac{\varepsilon_g}{T_g} \right)_i (T_{gi+1} - T_{gi}) - \left(\frac{\varepsilon_g}{v_g} \right)_i (v_{gi+1} - v_{gi}) \quad (9.22)$$

La temperatura del líquido en estado estacionario a la salida del núcleo del reactor a partir del modelo de transferencia de calor del combustible líquido en estado estacionario.

$$\begin{aligned}
(\rho Cp)_l \varepsilon_l v_l \frac{T_{lj+1} - T_{lj}}{\Delta z} &= u_{ll} \frac{T_{lj+1} - T_{lj}}{\Delta z} + u_{lg} \frac{T_{gj+1} - T_{gj}}{\Delta z} - a_v h (T_{lj+1} - T_{gj+1}) + \varepsilon_l q_j''' \\
+ K_{ll} \frac{T_{lj+2} - 2T_{lj+1} + T_{lj}}{\Delta z^2} &+ K_{lg} \frac{T_{gj+2} - 2T_{gj+1} + T_{gj}}{\Delta z^2}
\end{aligned} \tag{9.23}$$

$$\begin{aligned}
(\rho Cp)_l \varepsilon_l v_l \Delta z (T_{lj+1} - T_{lj}) &= u_{ll} \Delta z (T_{lj+1} - T_{lj}) + u_{lg} \Delta z (T_{gj+1} - T_{gj}) - a_v h \Delta z^2 (T_{lj+1} - T_{gj+1}) \\
+ \varepsilon_l \Delta z^2 q_j''' + K_{ll} (T_{lj+2} - 2T_{lj+1} + T_{lj}) &+ K_{lg} (T_{gj+2} - 2T_{gj+1} + T_{gj})
\end{aligned} \tag{9.24}$$

$$\begin{aligned}
-K_{ll} T_{lj+2} + \left((\rho Cp)_l \varepsilon_l v_l \Delta z - u_{ll} \Delta z + a_v h \Delta z^2 + K_{ll} \right) T_{lj+1} &+ \left(-(\rho Cp)_l \varepsilon_l v_l \Delta z + u_{ll} \Delta z - K_{ll} \right) T_{lj} \\
= \varepsilon_l \Delta z^2 q_j''' + K_{lg} T_{gj+2} + (u_{lg} \Delta z + a_v h \Delta z^2 - 2K_{lg}) T_{gj+1} &+ (-u_{lg} \Delta z + K_{lg}) T_{gj}
\end{aligned} \tag{9.25}$$

Coefficientes para la matriz tridiagonal

$$A = -(\rho Cp)_l \varepsilon_l v_l \Delta z + u_{ll} \Delta z - K_{ll} \tag{9.26}$$

$$B = (\rho Cp)_l \varepsilon_l v_l \Delta z - u_{ll} \Delta z + a_v h \Delta z^2 + K_{ll} \tag{9.27}$$

$$C = -K_{ll} \tag{9.28}$$

$$D = \varepsilon_l \Delta z^2 q_j''' + K_{lg} T_{gj+2} + (u_{lg} \Delta z + a_v h \Delta z^2 - 2K_{lg}) T_{gj+1} + (-u_{lg} \Delta z + K_{lg}) T_{gj} \tag{9.29}$$

La temperatura del gas en estado estacionario a la salida del núcleo del reactor a partir del modelo de transferencia de calor del gas.

$$(\rho Cp)_g \varepsilon_g v_{g_z} \frac{T_{gj+1} - T_{gj}}{\Delta z} = u_{gg} \frac{T_{gj+1} - T_{gj}}{\Delta z} + u_{gl} \frac{T_{lj+1} - T_{lj}}{\Delta z} - a_v h (T_{gj+1} - T_{lj+1}) + K_{gg} \frac{T_{gj+2} - 2T_{gj+1} + T_{gj}}{\Delta z^2} + K_{gl} \frac{T_{lj+2} - 2T_{lj+1} + T_{lj}}{\Delta z^2} \quad (9.30)$$

$$(\rho Cp)_g \varepsilon_g v_{g_z} \Delta z (T_{gj+1} - T_{gj}) = u_{gg} \Delta z (T_{gj+1} - T_{gj}) + u_{gl} \Delta z (T_{lj+1} - T_{lj}) - a_v h \Delta z^2 (T_{gj+1} - T_{lj+1}) + K_{gg} (T_{gj+2} - 2T_{gj+1} + T_{gj}) + K_{gl} (T_{lj+2} - 2T_{lj+1} + T_{lj}) \quad (9.31)$$

$$\begin{aligned} & -K_{gg} T_{gj+2} + \left((\rho Cp)_g \varepsilon_g v_{g_z} \Delta z - u_{ggzz} \Delta z + a_v h \Delta z^2 + 2K_{gg} \right) T_{gj+1} + \\ & \left(-(\rho Cp)_g \varepsilon_g v_{g_z} \Delta z + u_{ggzz} \Delta z - K_{gg} \right) T_{gj} = K_{gl} T_{lj+2} + \left(u_{glzz} \Delta z + a_v h \Delta z^2 - 2K_{gl} \right) T_{lj+1} \\ & + \left(-u_{glzz} \Delta z + K_{gl} \right) T_{lj} \end{aligned} \quad (9.32)$$

Coeficientes para la matriz tridiagonal

$$A = -u_{glzz} \Delta z + K_{gl} \quad (9.33)$$

$$B = u_{glzz} \Delta z + a_v h \Delta z^2 - 2K_{gl} \quad (9.34)$$

$$C = K_{gl} \quad (9.35)$$

$$D = -\left((\rho Cp)_g \varepsilon_g v_{g_z} \Delta z + u_{ggzz} \Delta z - K_{gg} \right) T_{gj} + \left((\rho Cp)_g \varepsilon_g v_{g_z} \Delta z - u_{ggzz} \Delta z + a_v h \Delta z^2 + 2K_{gg} \right) T_{gj+1} - K_{gg} T_{gj+2} \quad (9.36)$$

Perfil de potencia volumétrica no uniforme.

$$q_i''' = \frac{P_i}{V} = \frac{P_0}{V} \sin\left(\frac{i\Delta z\pi}{L}\right) \quad (9.37)$$

La caída de presión en el dominio computacional.

$$\Delta P = - \sum_i^{NN} (\Delta P_{ai} + \Delta P_{fi} + \Delta P_{gi}) \quad (9.38)$$

$$\Delta P_{ai} = \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right)_i - \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right)_{i+1} \quad (9.39)$$

$$\Delta P_{fi} = - \frac{\phi_{f0}^2 C_{f0} G_m^2 \Delta z}{D_h \rho_{li}} \quad (9.40)$$

$$\Delta P_{agi} = g \rho_{mi} \Delta z \quad (9.41)$$

$$\rho_{mi} = \varepsilon_{gi} \rho_{gi} + (1 - \varepsilon_{gi}) \rho_{li} \quad (9.42)$$

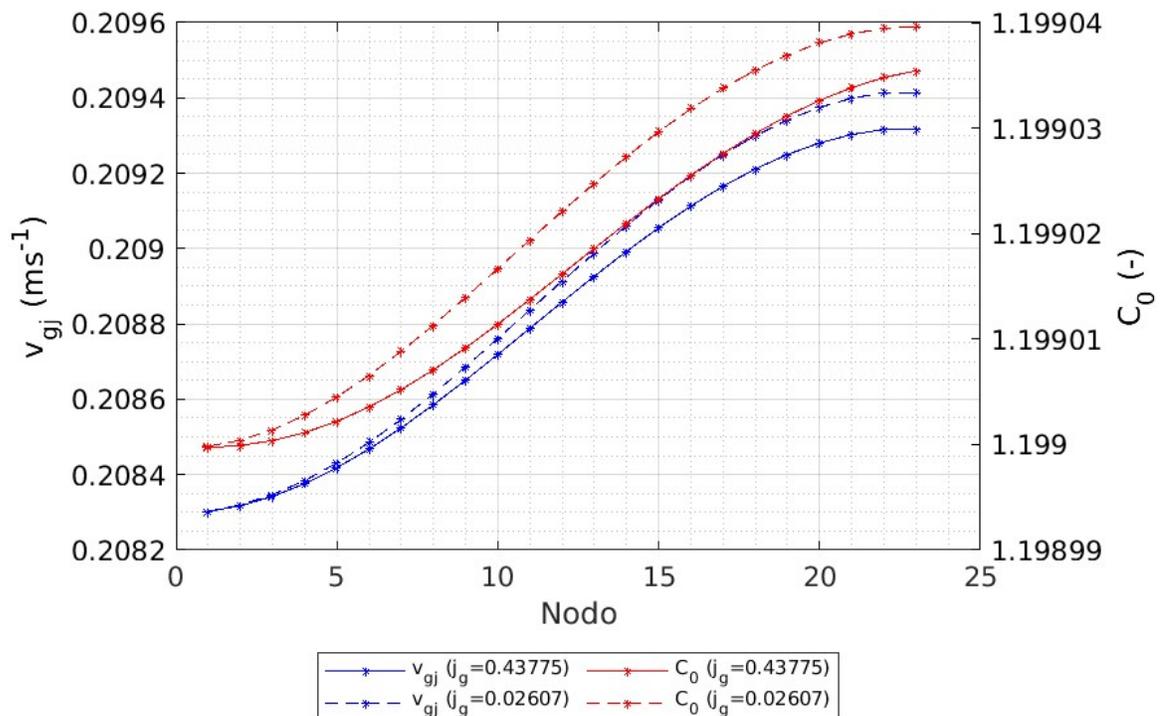
9.1 Experimentos numéricos de flujo en dos fases en estado estacionario

Los experimentos numéricos incluyen la comparación de dos valores distintos de velocidad superficial del gas con los cuales se tiene una fracción vacío de aproximadamente $\varepsilon_g = 0.0067$ y de aproximadamente 0.1.

La velocidad de arrastre y el parámetro de distribución aumentan porque existe un cambio en la densidad de cada uno, pero siendo mucho mayor la del líquido. Estos cambios se expresan en la [Figura 9](#) y en la [Tabla 11](#).

[Tabla 11](#). Parámetros de flujo relativo.
Salida

	Entrada	j_g [m/s] = 0.02607	j_g [m/s] = 0.43775
v_{gj} [m/s]	0.208302	0.209413	0.209316
C_0 [-]	1.198999	1.199039	1.199035



[Figura 9](#). Distribución de parámetros de flujo relativo.

La fracción vacío tiene una relación estrecha con el balance de masa, aumenta a la salida del núcleo del reactor nuclear de sal fundida como se observa en la [Tabla 12](#) y en la [Figura 10](#).

Tabla 12. Comparación de la fracción de vacíos

	$j_g [\text{m/s}] = 0.02607$		$j_g [\text{m/s}] = 0.43775$	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
$\epsilon_g [-]$	0.006712	0.007433	0.099996	0.109623

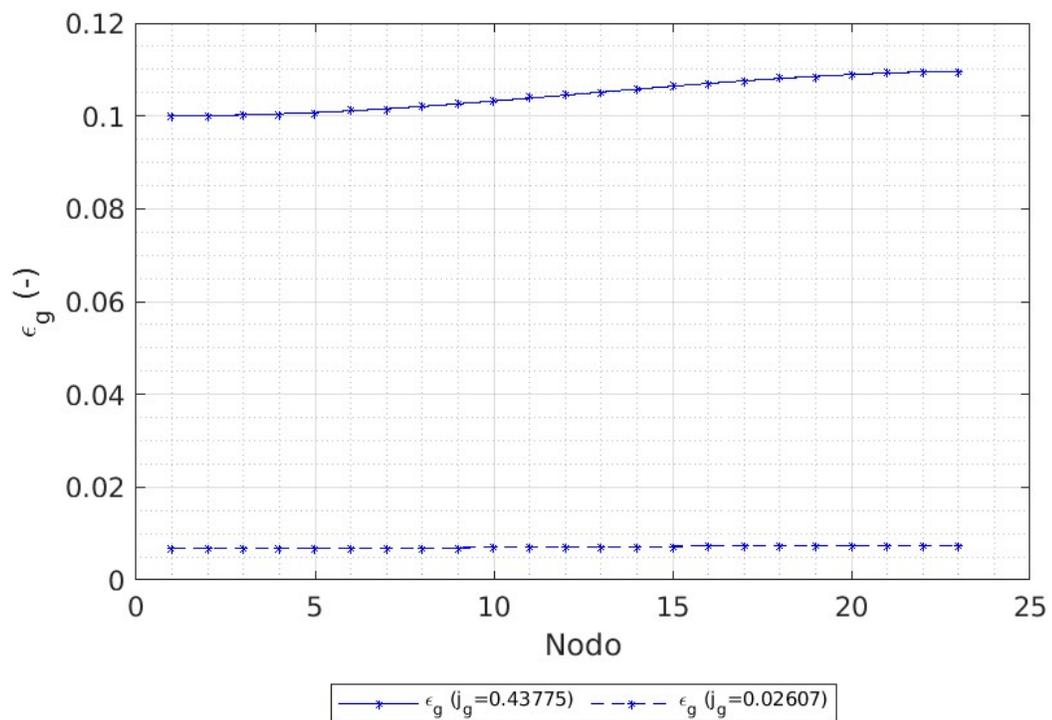


Figura 10. Distribución de fracción vacío

Como la fracción vacío aumenta, la velocidad superficial del gas aumentará, mientras que la velocidad superficial del líquido disminuye, como se puede observar en la [Tabla 13](#) y la [Figura 11](#).

Tabla 13. Velocidad superficial del gas y líquido.

	$j_g [\text{m/s}] = 0.02607$		$j_g [\text{m/s}] = 0.43775$	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
$j_g [\text{m/s}]$	0.02607	0.02887	0.43775	0.48001
$j_l [\text{m/s}]$	3.03961	3.03680	3.03961	2.99734
$j [\text{m/s}]$	3.06568	3.06568	3.47736	3.47736

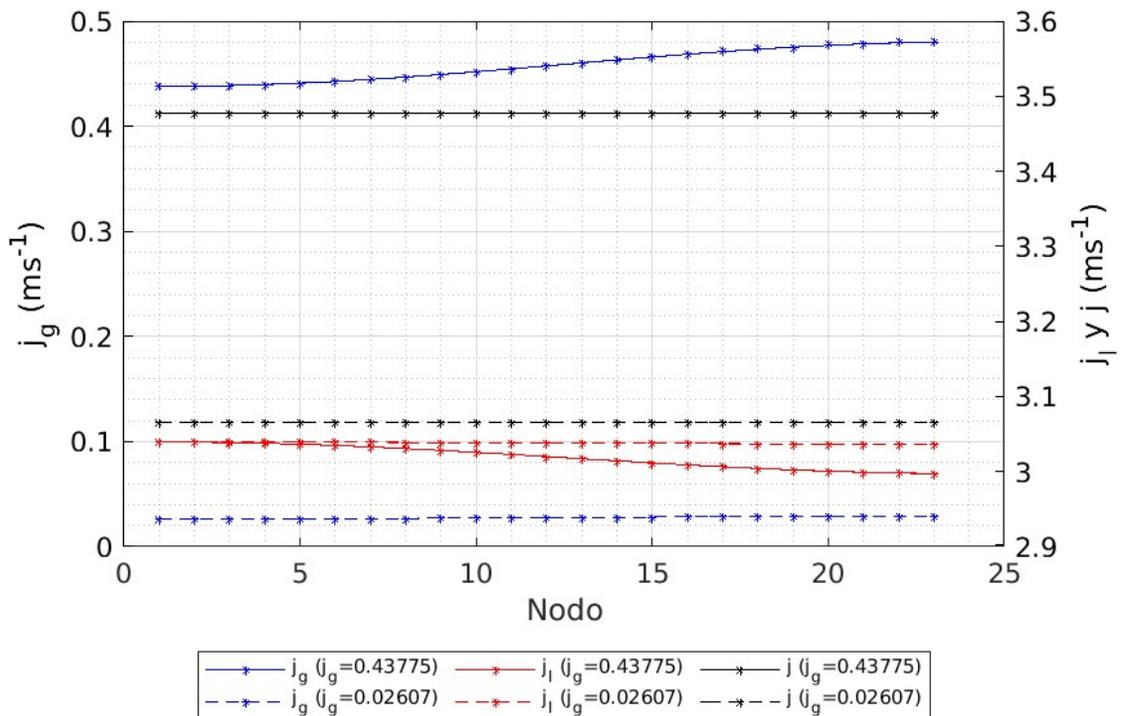


Figura 11. Distribución de velocidad superficial.

A la vez que la velocidad superficial del gas aumenta la velocidad promedio local del gas aumenta, y la del líquido disminuye, como se muestra en la [Tabla 14](#) y en la [Figura 12](#).

Tabla 14. Velocidad promedio local.

	$j_g [\text{m/s}] = 0.02607$		$j_g [\text{m/s}] = 0.43775$	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
v_g [m/s]	3.88405	3.88528	4.37765	4.37879
v_l [m/s]	3.06014	3.05954	3.37733	3.36637
v_r [m/s]	0.82390	0.82574	1.00032	1.01241

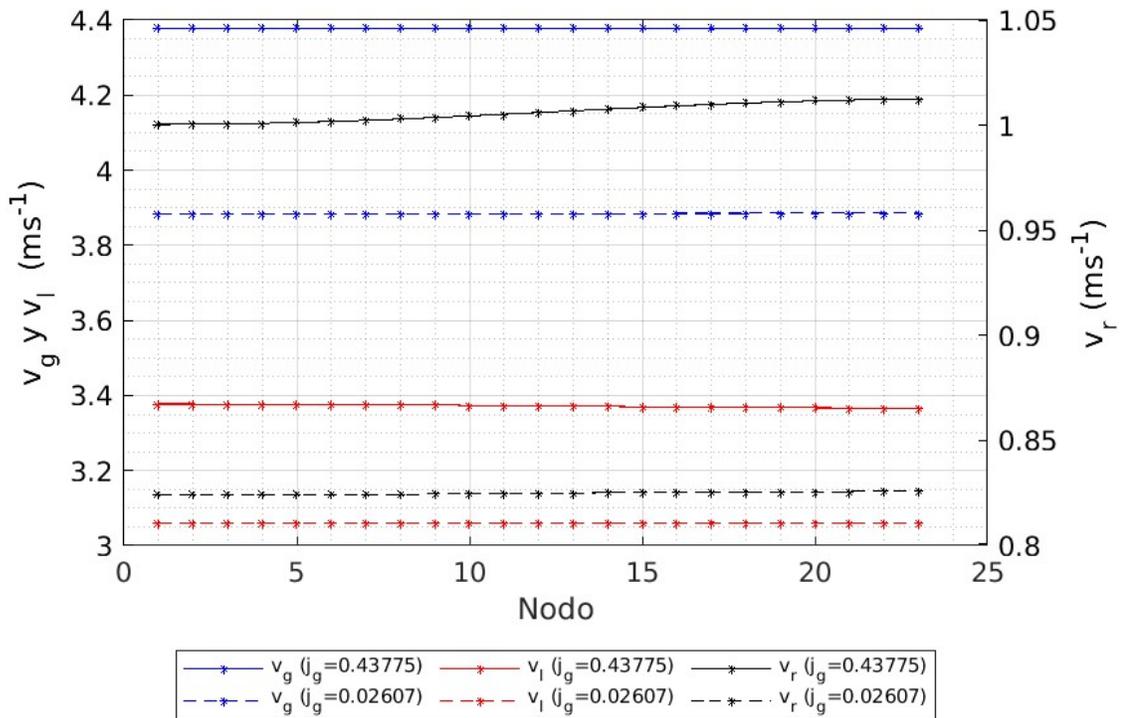


Figura 12. Distribución de velocidad promedio local

La temperatura del gas y del líquido aumentan a la salida del núcleo del reactor nuclear de sal fundida, existiendo una mayor diferencia entre ellos al tener una mayor velocidad superficial del gas a la entrada como se muestra en la [Tabla 15](#) y en la [Figura 13](#).

Tabla 15. Temperaturas del gas y del líquido
Salida

	Entrada	j_g [m/s] = 0.02607	j_g [m/s] = 0.43775
T_g [K]	923.15	1023.12	1012.49
T_l [K]	923.15	1023.15	1014.51
$\Delta T_{m\acute{a}x}$ [K]		1.1287	9.0597

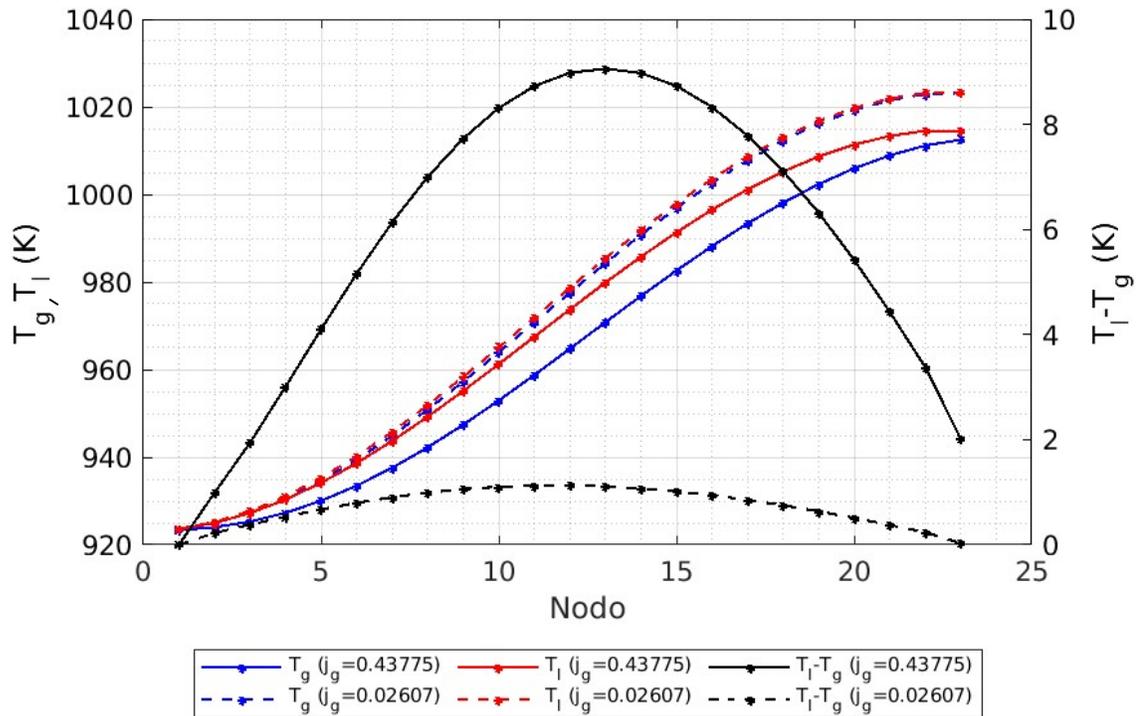


Figura 13. Distribución de temperatura.

Existe una mayor caída de presión al tener una menor velocidad superficial de entrada, como se muestra en la [Tabla 16](#) y en la [Figura 14](#).

Tabla 16. caída de presión.

	Salida		
	Entrada	j_g [m/s] = 0.02607	j_g [m/s] = 0.43775
P [kPa]	200.0	113.452	121.846
ΔP [kPa]		70.961	64.133

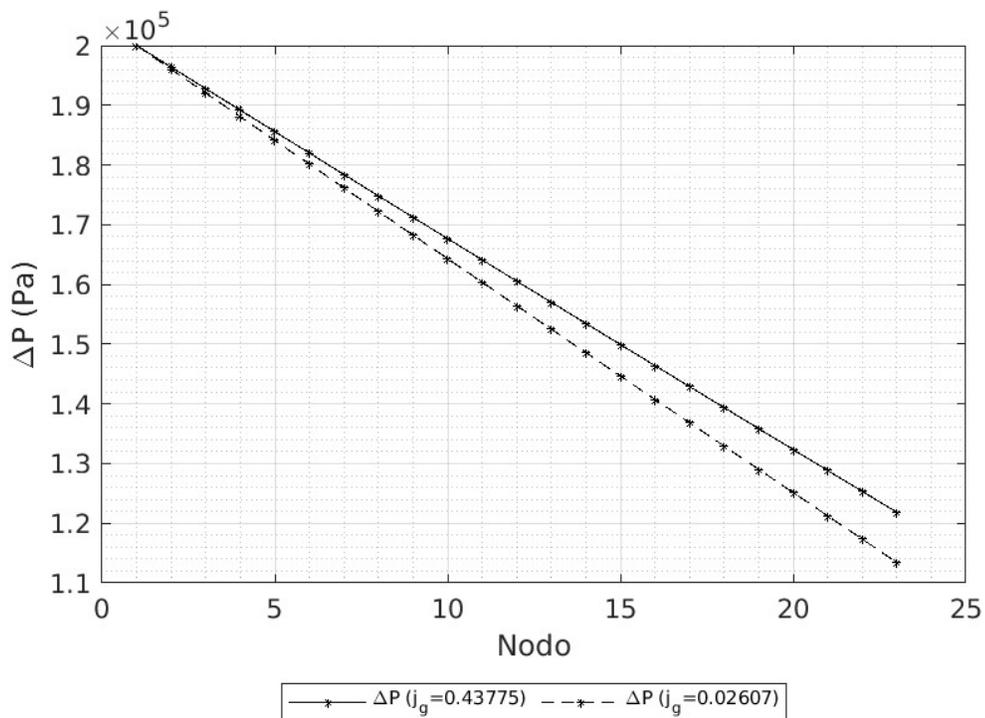


Figura 14. Distribución de la caída de presión.

9.2 Comparación entre flujo relativo y homogéneo

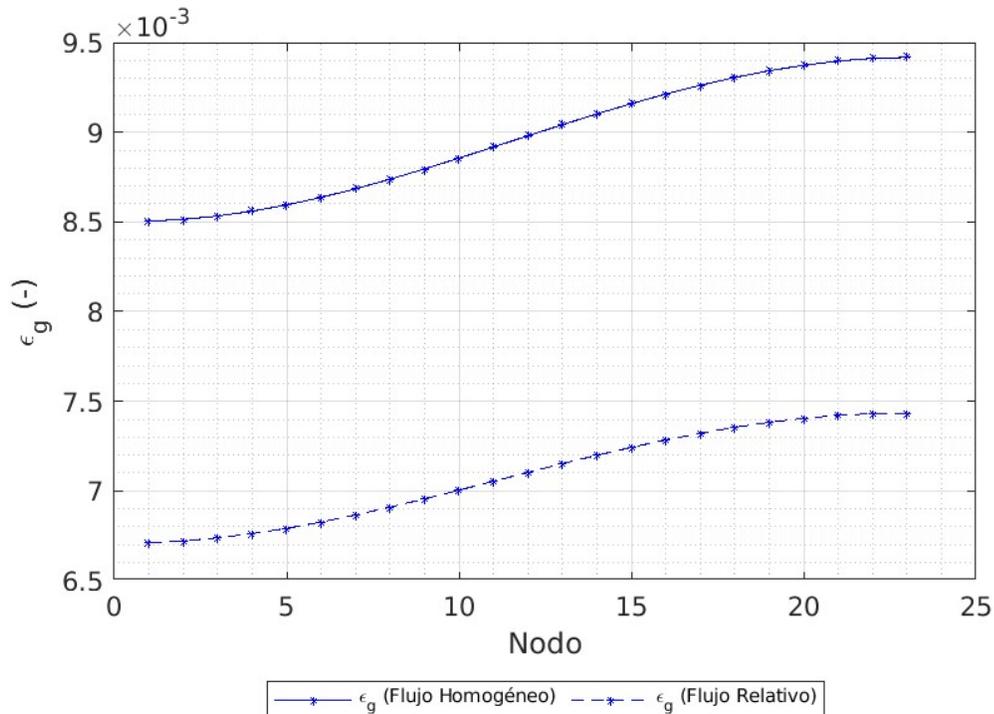
El modelo de flujo homogéneo se obtiene directamente del modelo de flujos relativos, aplicando los siguientes límites

$$\text{Flujo homogéneo} = \begin{cases} v_{gj} \rightarrow 0 \\ C_0 \rightarrow 1 \end{cases}$$

En esta comparación se usó la misma velocidad superficial del gas. La fracción vacío aumenta a la salida del núcleo del reactor de sal fundida usando $j_g [\text{m/s}] = 0.02607$ como se muestra en la [Tabla 17](#) y en la [Figura 15](#).

[Tabla 17](#). Fracción vacío.

	Flujo relativo		Flujo homogéneo	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
$\epsilon_g [-]$	0.006712	0.007433	0.008503	0.009417

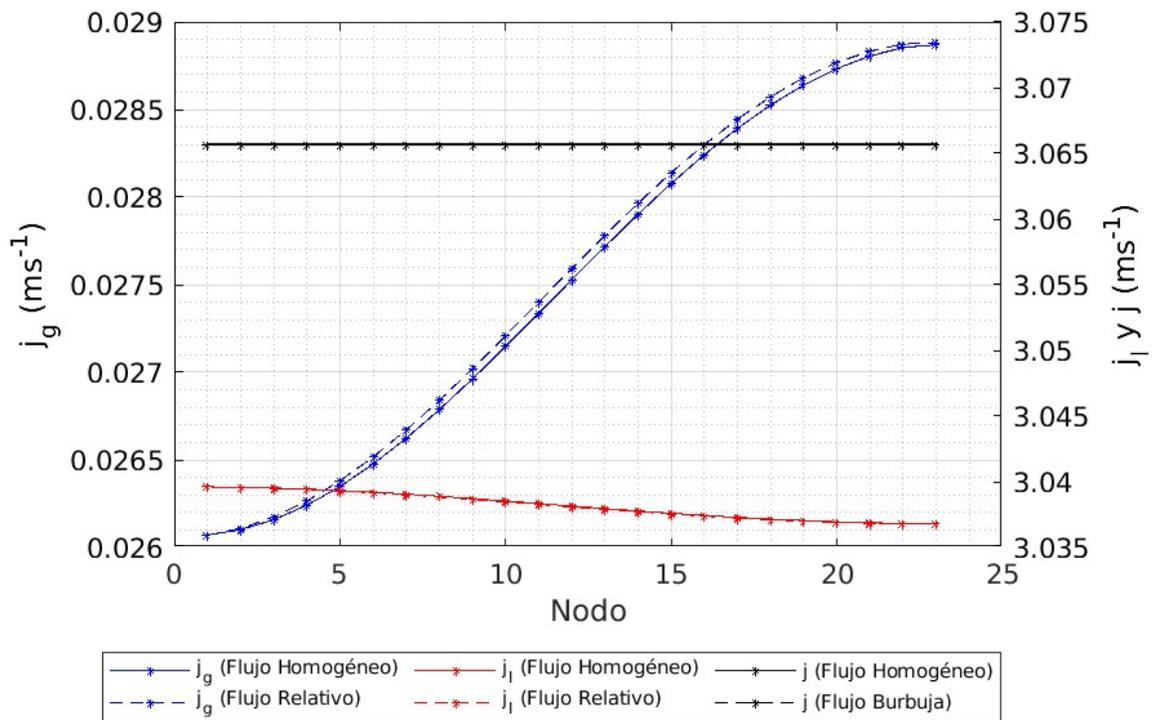


[Figura 15](#). Distribución de fracción vacío.

Las velocidades superficiales del gas no tienen un cambio significativo al ser flujo homogéneo o flujo relativo como se muestra en la [Tabla 18](#) y en la [Figura 16](#).

[Tabla 18](#). velocidad superficial.

	Salida		
	Entrada	Flujo relativo	Flujo homogéneo
j_g [m/s]	0.02607	0.02887	0.02887
j_l [m/s]	3.03961	3.03680	3.03680
j [m/s]	3.06568	3.06568	3.06568



[Figura 16](#). Distribución de velocidad superficial.

La velocidad promedio local del gas es menor al usar flujo homogéneo en comparación con flujo relativo, además de que al usar flujo homogéneo la velocidad promedio local del gas y del líquido es el mismo como se muestra en la [Tabla 19](#) y en la [Figura 17](#).

Tabla 19. Velocidad promedio local.

	Flujo relativo		Flujo homogéneo	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
v_g [m/s]	3.88405	3.88528	3.06568	3.06568
v_l [m/s]	3.06014	3.05954	3.06568	3.06568
v_r [m/s]	0.82390	0.82573	0.0	0.0

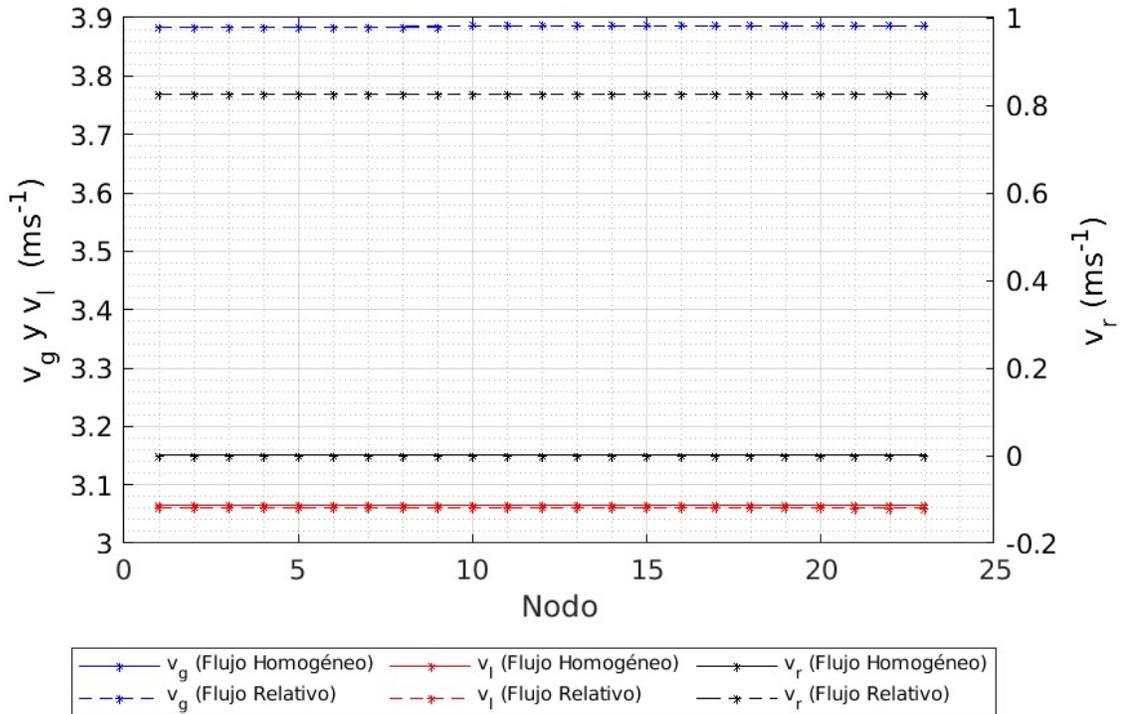


Figura 17. Distribución de velocidad promedio local.

La temperatura del gas y del líquido aumenta a la salida del núcleo del reactor nuclear de sal fundida, existiendo una pequeña diferencia entre el flujo homogéneo y el flujo relativo siendo mayor la del flujo relativo como se muestra en la [Tabla 20](#) y en la [Figura 18](#).

Tabla 20. Temperatura del gas y del líquido en flujo relativo y homogéneo.

	Entrada	Salida	
		Flujo relativo	Flujo homogéneo
T_g [K]	923.15	1023.12	1022.68
T_l [K]	923.15	1023.12	1022.97
$\Delta T_{m\acute{a}x}$ [K]		1.1287	3.4271

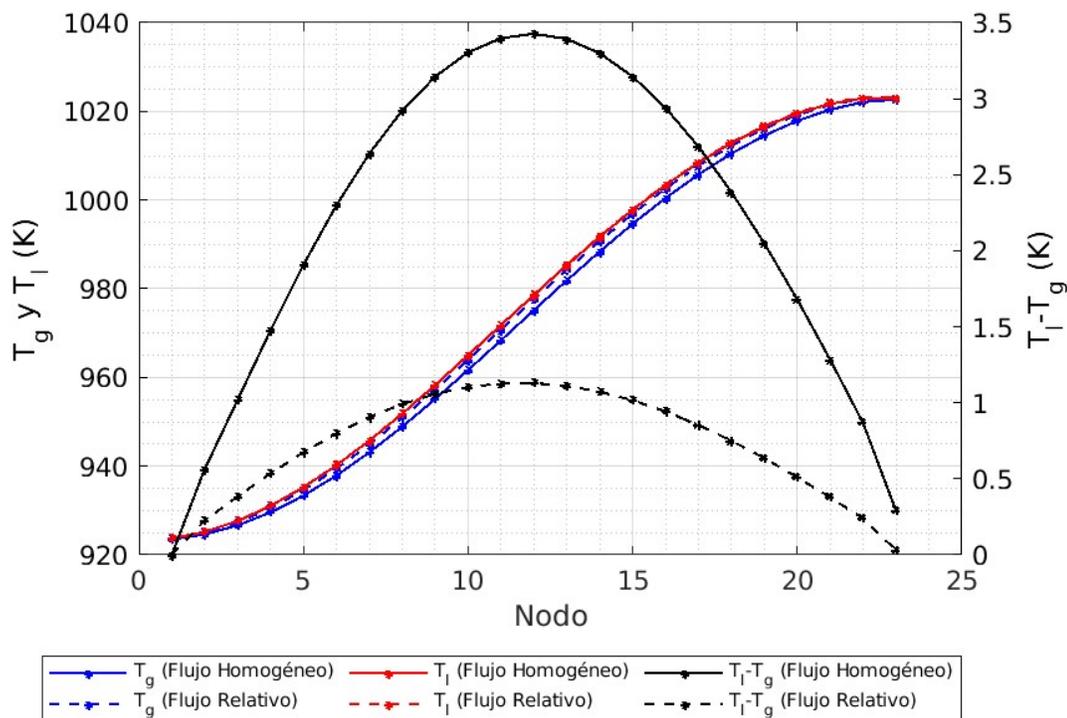
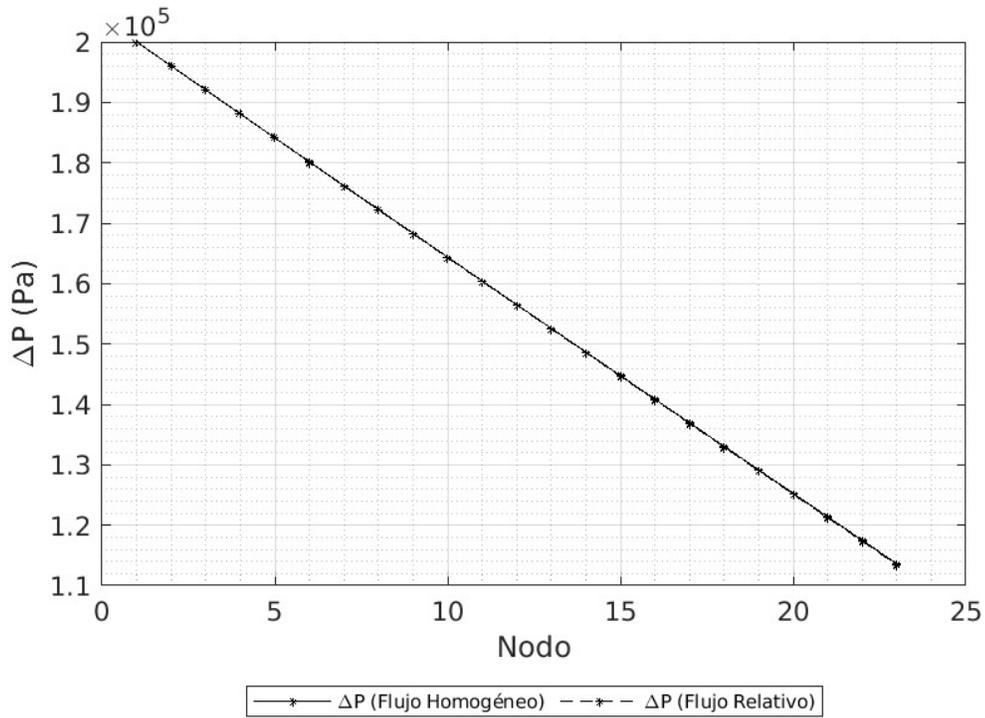


Figura 18. Distribución de temperatura.

La caída de presión es mayor al usar flujo homogéneo, la presión disminuye a la salida del núcleo del reactor nuclear de sal fundida y se tiene una caída de presión usando $j_g = 0.02607$ como se muestra en la [Tabla 21](#) y en la [Figura 19](#).

[Tabla 21](#). Caída de presión.

	Flujo relativo	Flujo homogéneo
ΔP [kPa]	70.961	70.829



[Figura 19](#). Distribución de la caída de presión.

10. Experimentos numéricos quasi-estacionario

En esta capítulo se realizaron experimentos numéricos en los cuales se acopla la cinética neutrónica y el análisis de flujo en dos fases.

10.1 Tiempo τ_L constante

La potencia llega al estado estacionario a los 40s con un valor de 3000MW, usando un valor de referencia $\tau_C = 4s$ y $\tau_L = 6s$, $j_g = 0.02607(m/s)$ y un volumen de $V = 0.144877(m^3)$. En la [Figura 20](#) y la [Tabla 22](#) se observa que al aumentar el tiempo τ_C la potencia del reactor aumenta, y al contrario.

Tabla 22. Potencia a diferentes tiempos τ_C

$\tau_L[s] = 6$			
Estado estacionario			
	$\tau_C[s] = 2$	$\tau_C[s] = 4$	$\tau_C[s] = 8$
P[MW]	2854.006	3005.584	3198.773

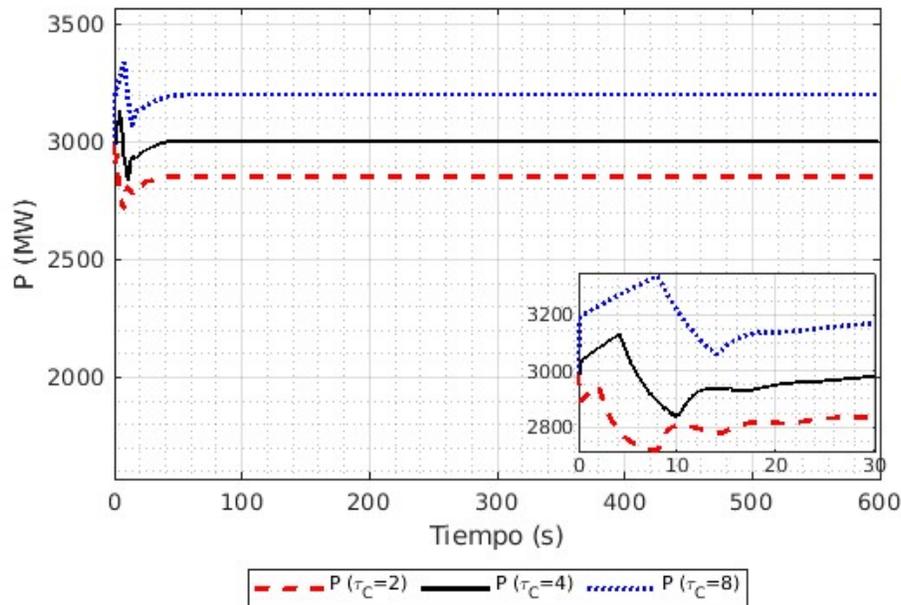


Figura 20. Potencia del reactor nuclear de sal fundida

Al aumentar la potencia volumétrica que está relacionada con la densidad neutrónica la temperatura del combustible líquido obtenida a partir del sistema de flujo en dos fases aumenta al tener un tiempo τ_C de referencia como se muestra en la [Figura 21](#) y [Tabla 23](#), de igual manera la temperatura del gas aumenta, mientras que al disminuir este tiempo τ_C disminuyen.

Tabla 23. Temperatura del gas y del líquido a diferentes tiempos τ_C

		$\tau_L[s] = 6$			
		Entrada	Salida		
			$\tau_C[s] = 2$	$\tau_C[s] = 4$	$\tau_C[s] = 8$
T_g [K]	923.15	1018.45	1023.12	1029.01	
T_l [K]	923.15	1018.48	1023.15	1029.05	

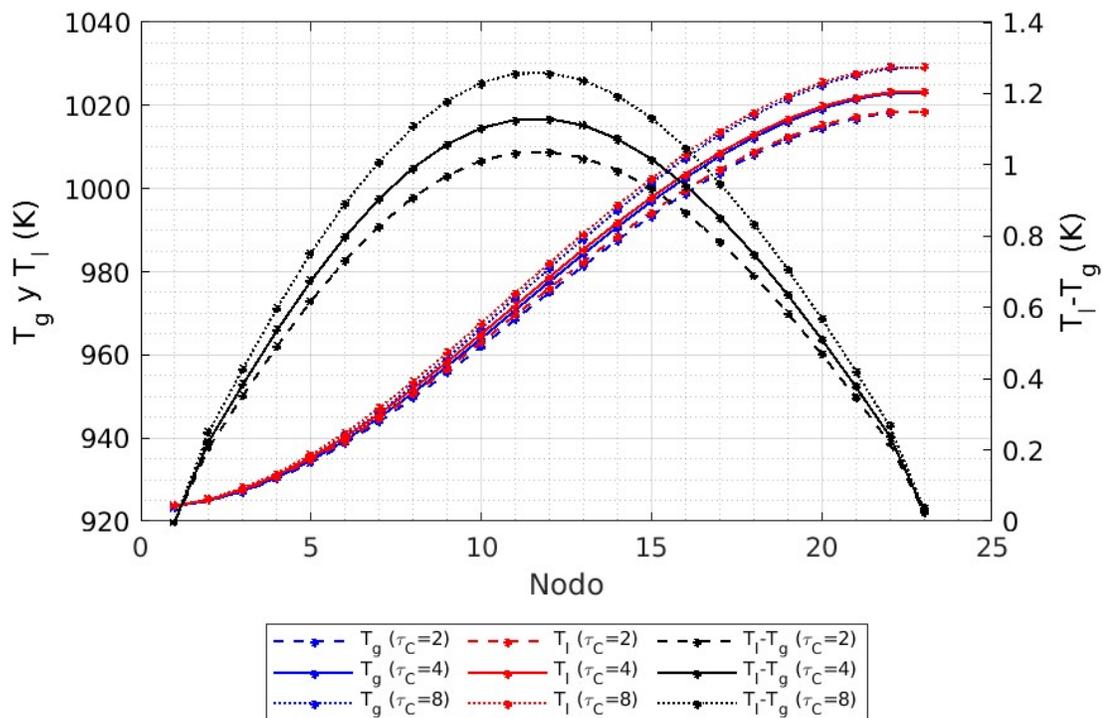
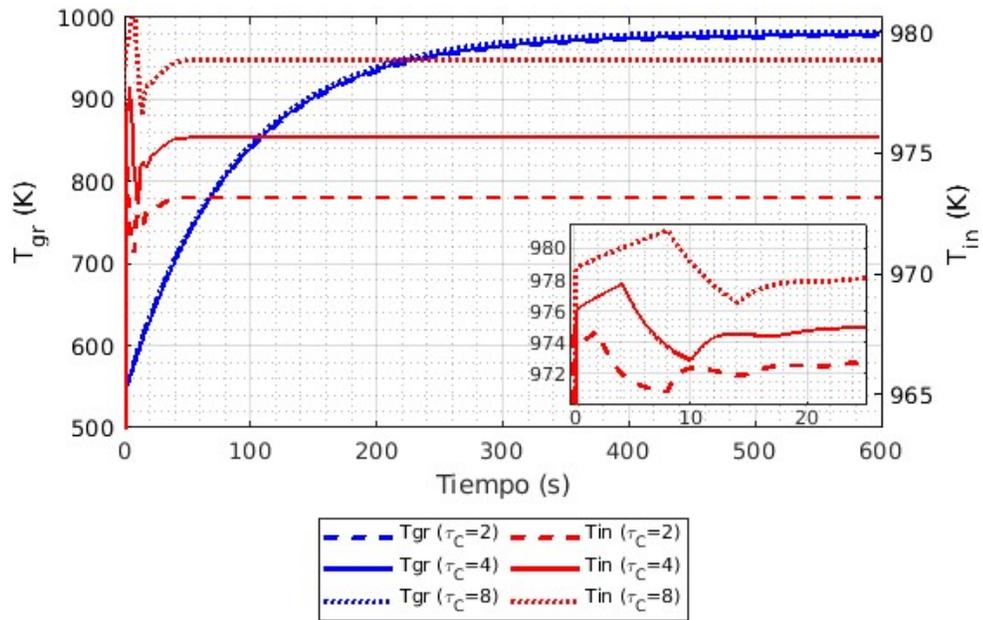


Figura 21. Temperatura del gas y del líquido dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida

En la [Figura 22](#) y [Tabla 24](#) se observa que la temperatura del grafito T_{gr} llega al estado estacionario a los 450s, la cual aumenta con tiempos τ_C mayores al de referencia y temperaturas menores al tener τ_C menores a los tiempos de referencia, de la misma manera se comporta la temperatura del intercambiador T_{in} .

[Tabla 24](#). Temperatura de entrada y del grafito a diferentes τ_C

	Estado estacionario		
	τ_C [s]=2	τ_C [s]=4	τ_C [s]=8
T_{gr} [K]	977.00	979.90	983.15
T_{in} [K]	973.15	975.67	978.87



[Figura 22](#). Temperatura a la entrada del reactor y del grafito.

La temperatura promedio del gas y del líquido aumentan al tener un mayor tiempo τ_C , como se muestra en la [Figura 23](#) y [Tabla 25](#).

Tabla 25. Temperatura del gas y del líquido

	$\tau_L[s] = 6$		
	Estado estacionario		
	$\tau_C[s] = 2$	$\tau_C[s] = 4$	$\tau_C[s] = 8$
$\langle T_g \rangle [K]$	973.31	975.77	978.87
$\langle T_l \rangle [K]$	973.97	976.49	979.67
$\langle T_l \rangle - \langle T_g \rangle [K]$	0.7112	0.7708	0.8635

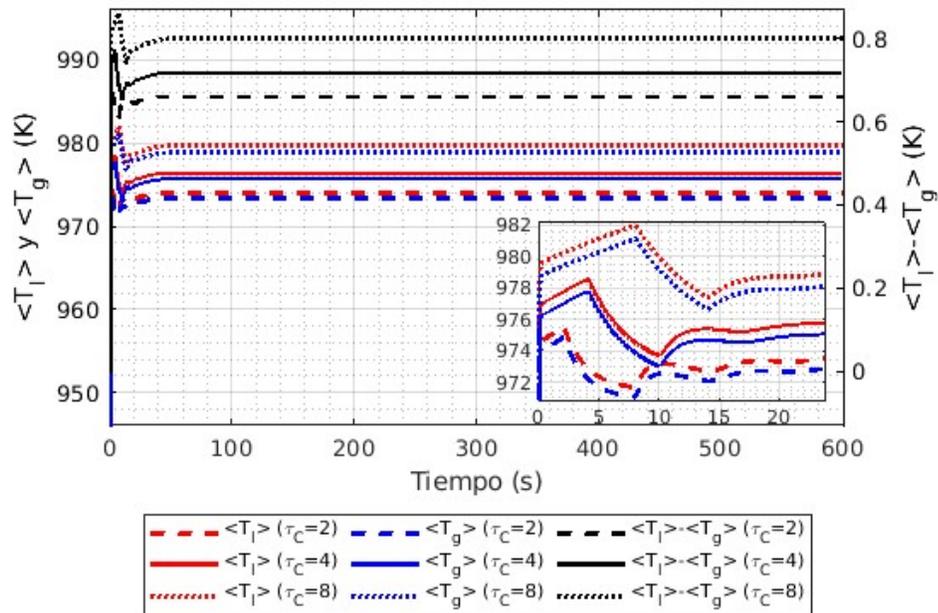
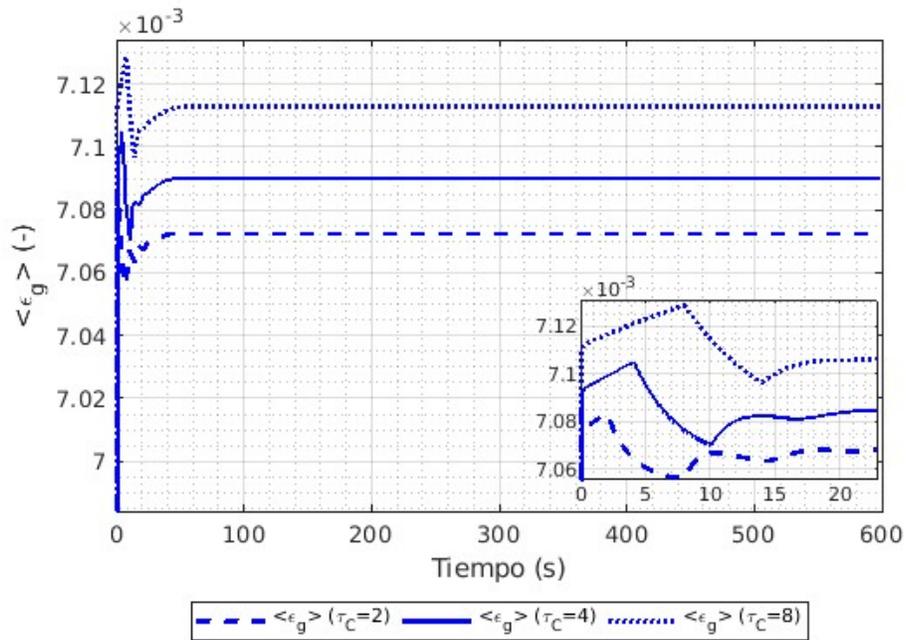


Figura 23. Temperatura promedio del gas y del líquido

La fracción vacío promedio se muestra en la [Figura 24](#) y [Tabla 26](#) la cual aumenta al tener un mayor tiempo τ_C

[Tabla 26](#). Fracción vacío promedio

$\langle \varepsilon_g \rangle [-]$	$\tau_L [s] = 6$		
	Estado estacionario		
	$\tau_C [s] = 2$	$\tau_C [s] = 4$	$\tau_C [s] = 8$
	0.007072	0.007090	0.007112



[Figura 24](#). Fracción vacío promedio

La fracción vacío está relacionada con los parámetros de flujo relativo v_{gj} y C_0 (Apendice E) que cambian con las propiedades físicas de gas helio y del combustible líquido, las cuales cambian con la temperatura que a su vez está relacionada con la densidad neutrónica, por lo que al aumentar el tiempo τ_C en relación a la referencia la fracción vacío también aumentara y al disminuir el tiempo τ_C la fracción vacío disminuirá como se muestra en la Figura 25 y Tabla 27.

Tabla 27. Fracción vacío a diferentes τ_C

		$\tau_L[s] = 6$		
		Salida		
Entrada		$\tau_C[s] = 2$	$\tau_C[s] = 4$	$\tau_C[s] = 8$
$\epsilon_g [-]$	0.00671	0.00739	0.00743	0.00747

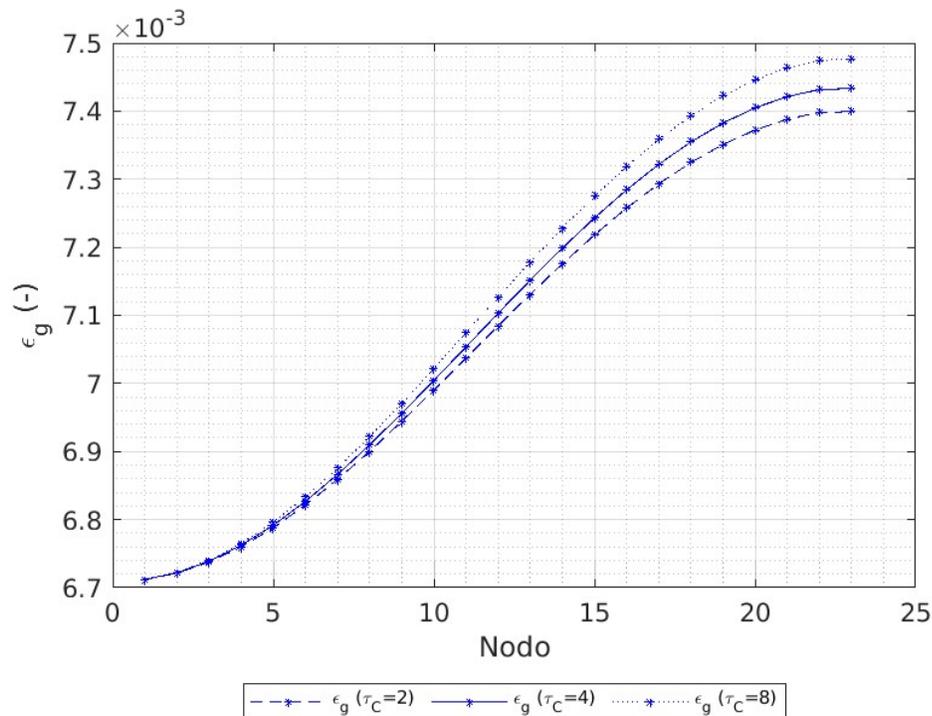
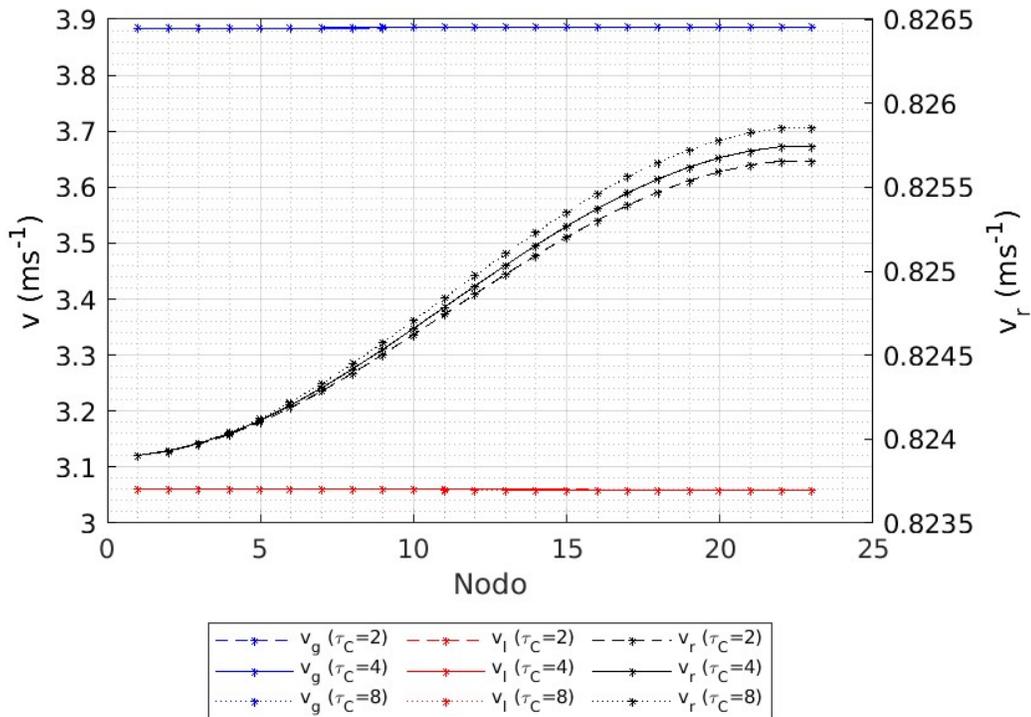


Figura 25. Fracción vacío dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida.

En la [Figura 26](#) y [Tabla 28](#) se observa que al tener mayor tiempo τ_C respecto al de referencia las velocidades del gas y del líquido aumentan porque tienen relación a la fracción vacío, además que al disminuir el tiempo τ_C las velocidades disminuyen.

[Tabla 28](#). velocidad del gas, del líquido y relativa a diferentes τ_C

$\tau_L[s] = 6$				
	Entrada	Salida		
		$\tau_C[s] = 2$	$\tau_C[s] = 4$	$\tau_C[s] = 8$
v_g [m/s]	3.8840	3.8852	3.8852	3.8853
v_l [m/s]	3.0601	3.0595	3.0595	3.0595
v_r [m/s]	0.8239	0.8256	0.8257	0.8258

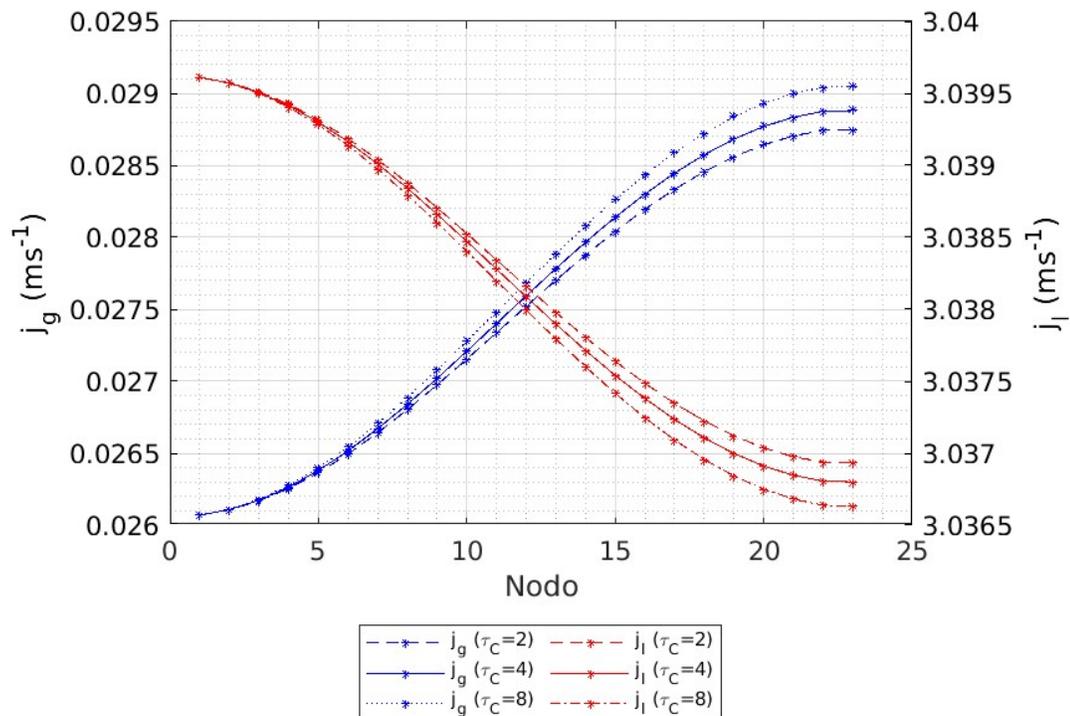


[Figura 26](#). velocidades dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida

La velocidad superficial del gas aumenta y del líquido disminuye porque tienen relación con la fracción vacío que a su vez aumenta con tiempos de circulación del combustible líquido τ_C mayores al valor de referencia, mientras que con tiempos τ_C menores, la velocidad superficial del gas disminuye y del líquido aumenta al valor de referencia como se muestra en la [Figura 27](#) y [Tabla 29](#).

[Tabla 29](#). Velocidad superficial del gas y del líquido a diferentes τ_C

		$\tau_L[s] = 6$			
		Entrada	Salida		
			$\tau_C[s] = 2$	$\tau_C[s] = 4$	$\tau_C[s] = 8$
j_g [m/s]	0.02607	0.02874	0.02887	0.02904	
j_l [m/s]	3.03961	3.03693	3.03680	3.03663	

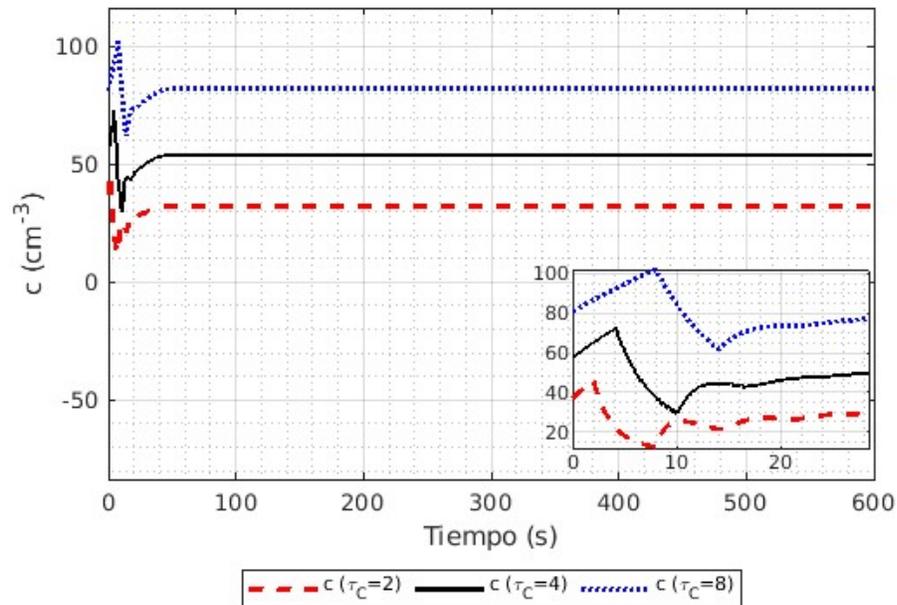


[Figura 27](#). Velocidad superficial del líquido y del gas en el núcleo del reactor

La concentración de precursores aumenta porque está relacionada con la densidad neutrónica siendo mayor al valor de referencia usando tiempos de circulación del combustible líquido τ_C mayores y viceversa al tener tiempos de circulación del combustible líquido τ_C menores al de referencia, además de llegar al estado estacionario a los 40s como se muestra en la [Figura 28](#) y [Tabla 30](#).

[Tabla 30](#). Concentración de precursores a diferentes tiempos τ_C

$c[\text{cm}^{-3}]$	$\tau_L[\text{s}] = 6$		
	Estado estacionario		
	$\tau_C[\text{s}] = 2$	$\tau_C[\text{s}] = 4$	$\tau_C[\text{s}] = 8$
	32.2454	54.1405	82.0471



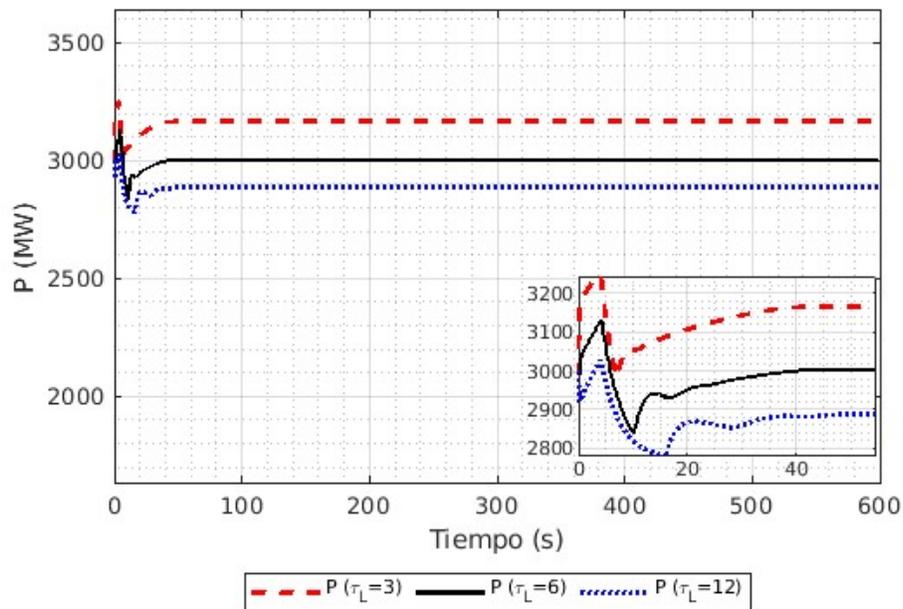
[Figura 28](#). Concentración de precursores dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida

10.2 Tiempo τ_C constante

En este capítulo se varía el tiempo τ_L , en la [Figura 29](#) y [Tabla 31](#) la potencia llega al estado estacionario a los 40s con un valor de $3000MW$, usando tiempos de referencia $\tau_C[s]=4$ y $\tau_L[s]=6$, al aumentar el tiempo τ_L la potencia disminuye, y al disminuirlo la potencia aumenta.

[Tabla 31](#). Potencia del reactor nuclear variando el tiempo τ_L

$\tau_C[s] = 4$			
Estado estacionario			
	$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
P[MW]	3165.567	3005.584	2888.570

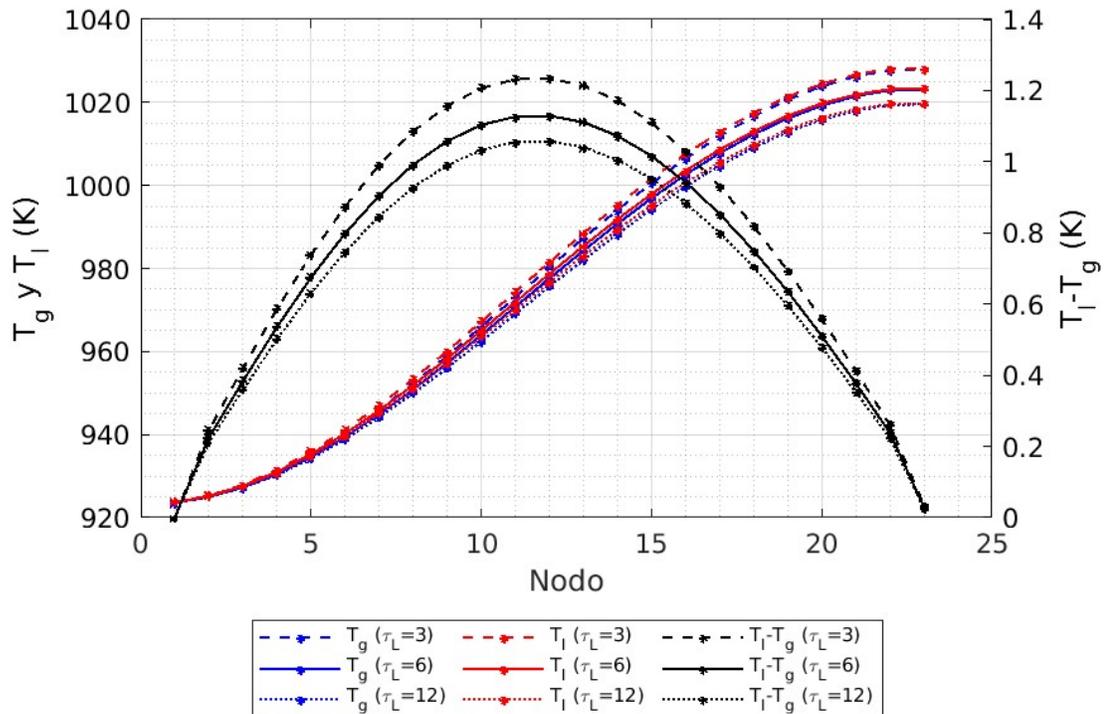


[Figura 29](#). Potencia del reactor nuclear de sal fundida

Para calcular la temperatura se usa la potencia volumétrica que está relacionada con la densidad neutrónica, al tener un tiempo τ_L menor las temperaturas del gas y del líquido aumentan, mientras que al disminuir el tiempo τ_L las temperaturas disminuyen, como se muestra en la [Figura 30](#) y [Tabla 32](#).

[Tabla 32](#). Temperatura del gas y del combustible líquido a diferentes τ_L

		$\tau_C[s] = 4$			
		Entrada	Salida		
			$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
T_g [K]	923.15	1028.00	1023.12	1019.52	
T_l [K]	923.15	1028.04	1023.15	1019.55	



[Figura 30](#). Temperatura del gas y del líquido dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida.

La temperatura del grafito T_{gr} llega al estado estacionario a los 450s, siendo esta mayor usando tiempos τ_L menores, y menores con tiempos τ_L mayores a la referencia como se muestra en la Figura 31 y Tabla 33, de la misma manera se comporta la temperatura del intercambiador T_{in} .

Tabla 33. Temperatura del grafito y a la entrada del reactor cambiando el tiempo τ_L

	Estado estacionario		
	τ_L [s] = 3	τ_L [s] = 6	τ_L [s] = 12
T_{gr} [K]	982.53	979.70	977.64
T_{in} [K]	978.30	975.67	973.75

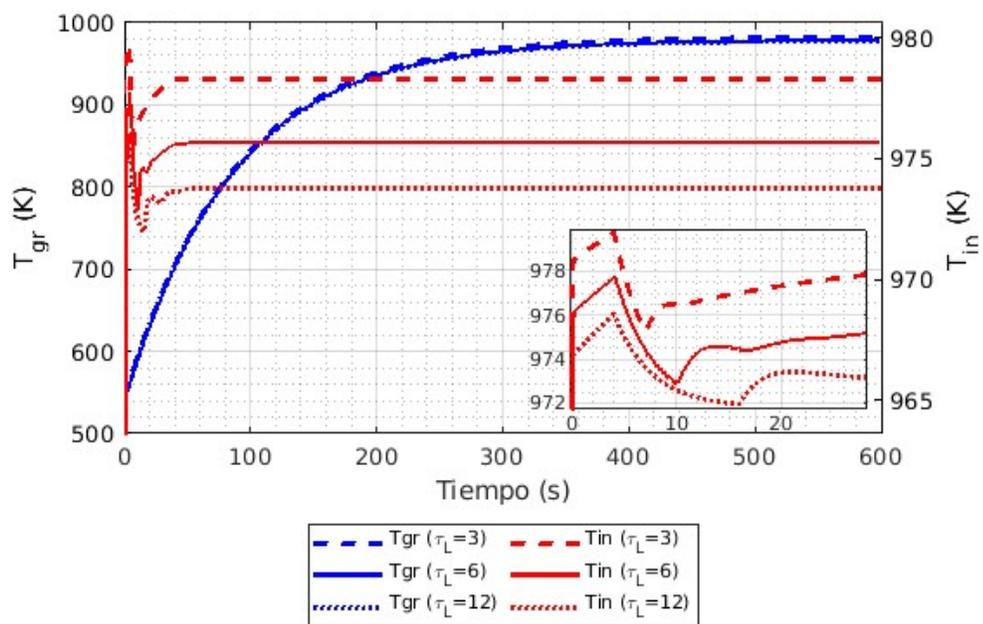


Figura 31. Temperatura del grafito y a la entrada del núcleo del reactor nuclear de sal fundida

Las temperaturas promedio del gas y del líquido aumentan al tener un menor tiempo τ_L , como se muestra en la [Figura 32](#) y [Tabla 34](#).

Tabla 34. Temperatura promedio del gas y del líquido

	$\tau_C[s] = 4$		
	Estado estacionario		
	$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
$\langle T_g \rangle [K]$	978.34	975.77	973.87
$\langle T_l \rangle [K]$	979.13	976.49	974.55
$\langle T_l \rangle - \langle T_g \rangle [K]$	0.8253	0.7708	0.7278

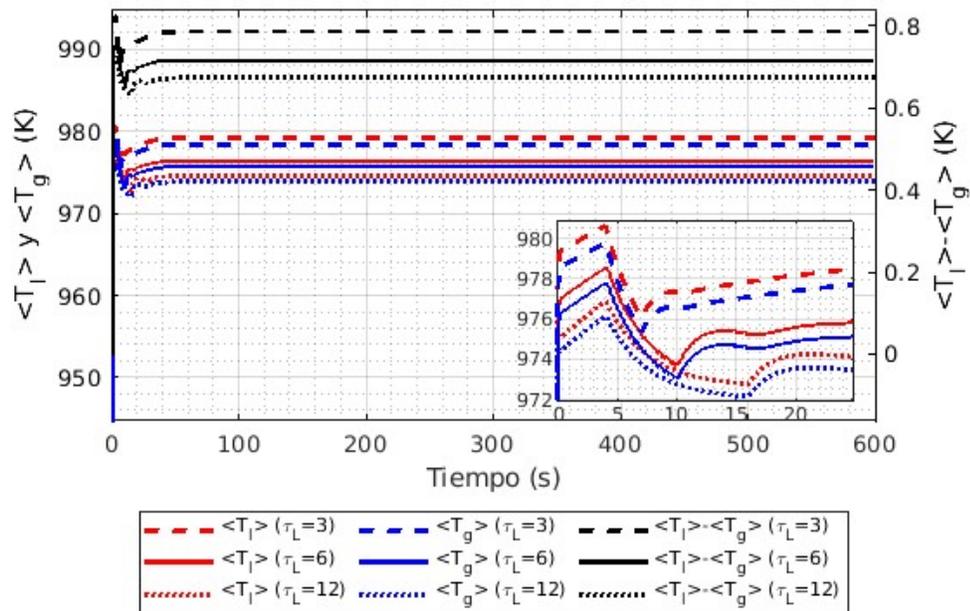


Figura 32. Temperatura promedio del gas y del líquido

La fracción vacío está relacionada con los parámetros de flujo relativo v_{gj} y C_0 (Apendice E) los cuales dependen de las propiedades fisicoquímicas que a su vez dependen de las temperaturas, al tener el tiempos de circulación del combustible líquido τ_L menores al valor de referencia la fracción vacío aumenta y menores al tener tiempos τ_L mayores al de referencia, como se muestra en la Figura 33 y Tabla 35.

Tabla 35. Fracción vacío en el reactor al variar el tiempo τ_L

		$\tau_C[s] = 4$		
		Salida		
Entrada		$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
$\epsilon_g[-]$	0.00671	0.00746	0.00743	0.00740

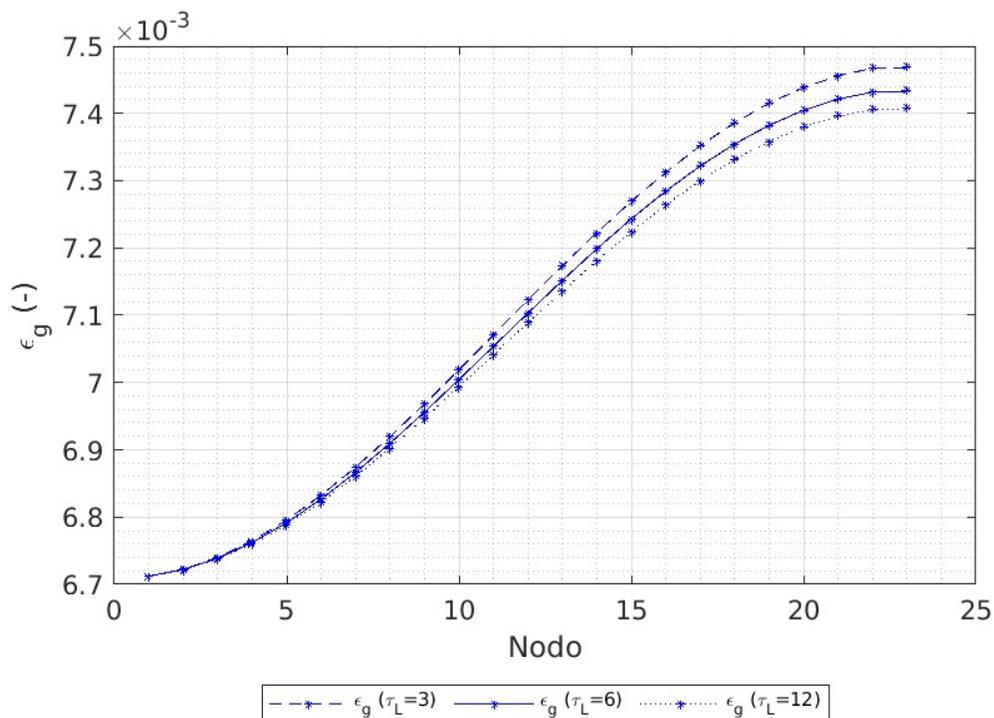


Figura 33. Fracción vacío dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida.

La fracción vacío promedio se muestra en la [Figura 34](#) y [Tabla 36](#) la cual aumenta al tener un menor tiempo τ_L

Tabla 36. Fracción vacío promedio

$\tau_C[s] = 4$			
Estado estacionario			
	$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
$\langle \epsilon_g \rangle [-]$	0.007108	0.007090	0.007076

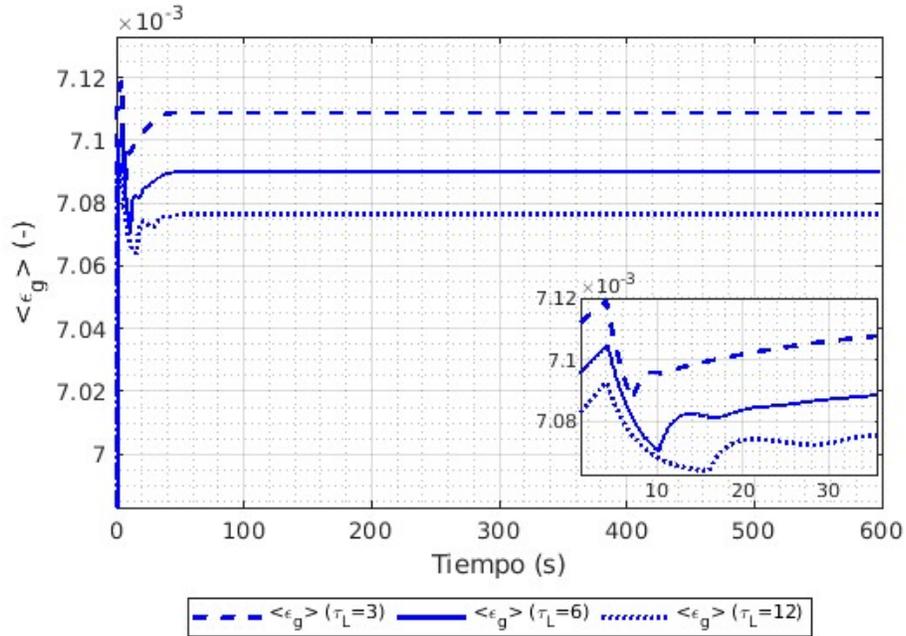


Figura 34. Fracción vacío promedio

Como la fracción vacío disminuye con valores de τ_L mayores al de referencia la velocidad relativa disminuye y teniendo tiempos τ_L menores al de referencia la velocidad relativa aumenta, como se observa en la [Figura 35](#) y [Tabla 37](#).

Tabla 37. Velocidad del gas, del combustible y relativa cambiando el tiempo τ_L

	$\tau_C[s] = 4$			
	Entrada	Salida		
		$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
v_g [m/s]	3.8840	3.8853	3.8852	3.8852
v_l [m/s]	3.0601	3.0595	3.0595	3.0595
v_r [m/s]	0.8239	0.8258	0.8257	0.8256

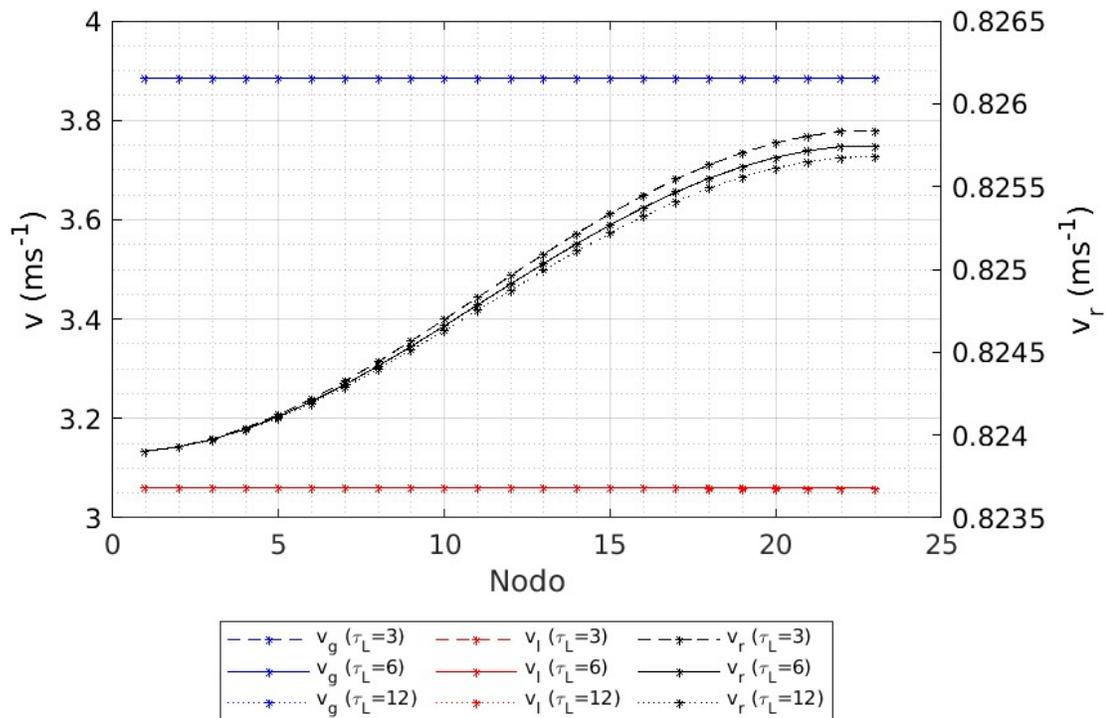


Figura 35. Velocidades dentro del núcleo del reactor nuclear de sal fundida

Las velocidades superficiales también están relacionadas con la fracción vacío, se puede observar en la [Figura 36](#) y [Tabla 38](#) la velocidad superficial del gas disminuye y la del líquido aumenta en relación con el valor de referencia al usar tiempos τ_L mayores, y al contrario al usar valores de tiempo τ_L menores.

Tabla 38. Velocidad superficial del gas y del líquido al cambiar el tiempo τ_L

	$\tau_C[s] = 4$			
	Entrada	Salida		
		$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
j_g [m/s]	0.02607	0.02901	0.02887	0.02877
j_l [m/s]	3.03961	3.03666	3.03680	3.03690

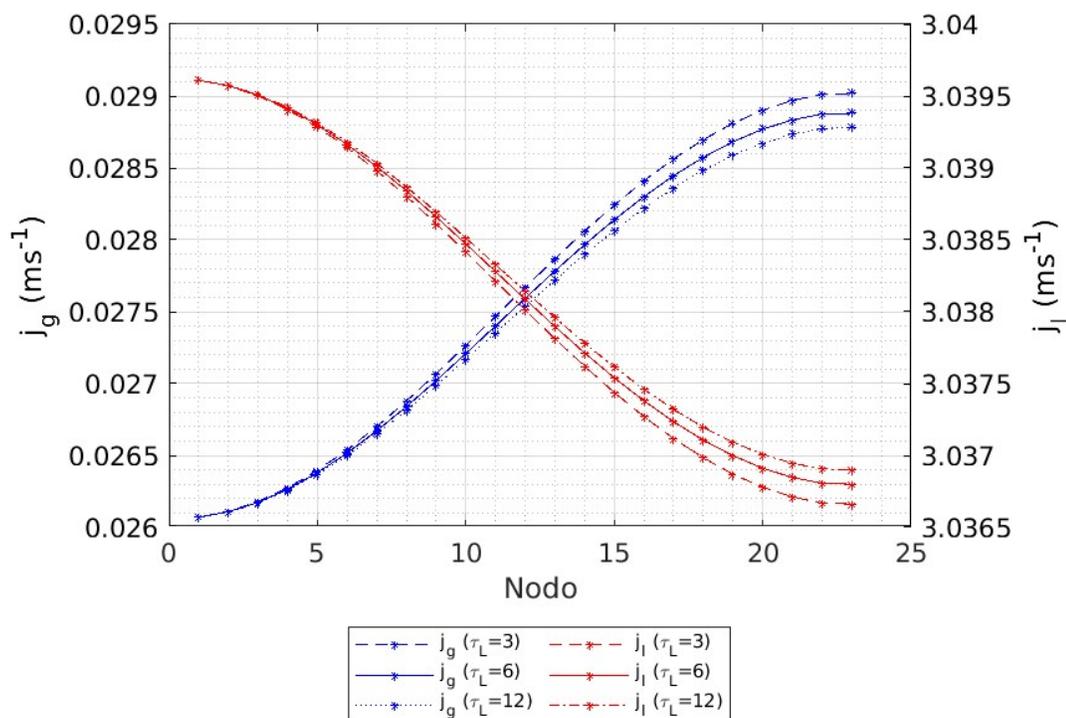
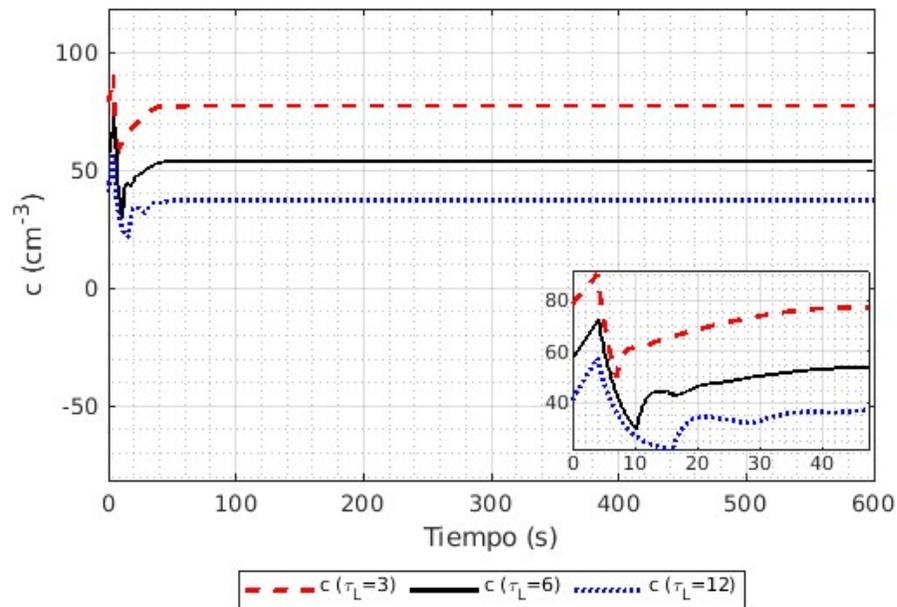


Figura 36. Velocidad superficial del gas y del combustible líquido en el núcleo del reactor de sal fundida

En la [Figura 37](#) y [Tabla 39](#) se observa que la concentración de precursores aumenta con valores de tiempo τ_L menores al de referencia, y menores al tener tiempos de circulación del combustible líquido τ_L mayores, además de llegar al estado estacionario a los 40s.

[Tabla 39.](#) Concentración de precursores en el núcleo al cambiar el tiempo τ_L

$\tau_C[s] = 4$			
Estado estacionario			
	$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
$c[\text{cm}^{-3}]$	77.2488	54.1405	37.2402



[Figura 37.](#) Concentración de precursores en el núcleo del reactor de sal fundida.

11. Discusión de resultados

11.1 Flujo en dos fases.

Usando los resultados del capítulo 9.1 donde se usan dos velocidades superficiales, en la [Tabla 40](#) se puede observar que al usar una mayor velocidad superficial del gas se tendrá una menor temperatura tanto del líquido como del gas, al compararla al usar una menor velocidad superficial del gas. Por lo que se puede decir que es mejor usar velocidades superficiales del gas menores.

Tabla 40. Propiedades variables y variando la velocidad superficial.

	Potencia no Uniforme	
	j_g [m/s] = 0.02607	j_g [m/s] = 0.43775
V [m ³]	0.174989	
q_{\max}''' [MW/m ³]	1415.73	
T_l [K]	1023.15	1014.51
T_g [K]	1023.12	1012.49

Con la información del capítulo 9.2 al usar solo una velocidad superficial para comparar el flujo relativo y el flujo homogéneo, se observa en la [Tabla 41](#) que las temperaturas son menores usando flujo homogéneo.

Tabla 41. Propiedades variables usando flujo relativo y flujo homogéneo.

	j_g [m/s] = 0.02607	
	Flujo relativo	Flujo homogéneo
V [m ³]	0.174989	
q_{\max}''' [MW/m ³]	1415.73	
T_l [K]	1023.15	1022.97
T_g [K]	1023.12	1022.68

El volumen activo usado para obtener una temperatura del líquido de $T_l = 1023.15\text{K}$ es de $V = 0.174989\text{m}^3$, con una velocidad superficial de j_g [m/s] = 0.02607, potencia no uniforme y propiedades variables.

11.2 Acoplamiento Cinética neutrónica y flujo en dos fases

Recopilando los resultados del capítulo 10 de los experimentos numéricos quasi-estacionarios en la [Tabla 42](#) y de la potencia en la [Figura 38](#).

[Tabla 42](#). Resultados sistema quasi-estacionario

	τ_L constante		Referencia	τ_C constante	
	τ_L [s] = 6		τ_L [s] = 6	τ_C [s] = 4	
	τ_C [s] = 2	τ_C [s] = 8	τ_C [s] = 4	τ_L [s] = 3	τ_L [s] = 12
P[MW]	2854.006	3198.773	3005.584	3165.567	2888.570
T_l [K]	1018.48	1029.05	1023.15	1028.04	1019.55
ε_g [-]	0.00739	0.00747	0.00743	0.00746	0.00740
v_r [m/s]	0.8256	0.8258	0.8257	0.8258	0.8256
j_g [m/s]	0.02874	0.02904	0.02887	0.02901	0.02877
c [cm ⁻³]	32.2454	82.0471	54.1405	77.2488	37.2402

Al analizar los resultados se puede observar que es mejor tener tiempos τ_C más grandes de circulación del combustible líquido en el núcleo del reactor que en el lazo externo, que además se tiene una mayor fracción vacío y una mayor concentración de precursores.

Además, al tener tiempos τ_L menores de circulación del combustible líquido en el lazo externo se consigue tener mayor temperatura del combustible, potencia, fracción vacío y concentración de precursores. Se puede decir que el mejor escenario sería tener mayor tiempo τ_C que es el tiempo que tarda en circular el combustible líquido en el núcleo del reactor y tener un tiempo τ_L menor para que el combustible líquido circule en el lazo externo, se tendría mayor potencia, fracción vacío y concentración de precursores.

Con menores tiempos de residencia del combustible líquido en el núcleo y tiempos largos en el lazo externo da como resultado una menor potencia y menor temperatura del combustible.

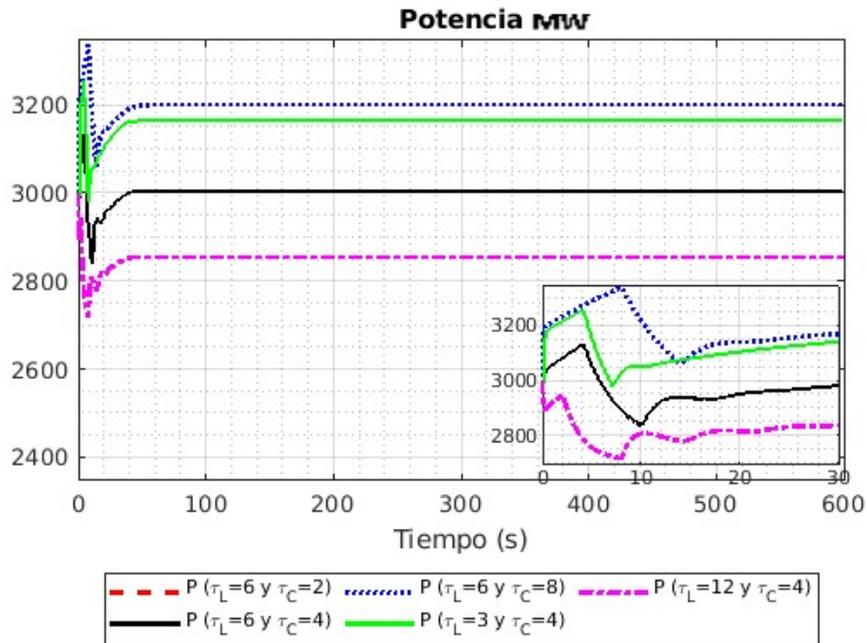


Figura 38. Potencia a diferentes tiempos de circulación del combustible líquido.

El volumen activo usado en esta análisis se redujo a $V = 0.144877\text{m}^3$ para obtener una temperatura del líquido de $T_l = 1023.15\text{K}$.

12. Conclusiones.

Se concluye que al tener una mayor fracción vacío va a existir una reducción de diez grados Kelvin en la temperatura del gas y ocho grados Kelvin en la temperatura del líquido, esto resultados al hacer la comparación al usar las velocidades superficiales propuesta de entra al reactor.

Cuando se comparan la aproximación de flujo homogéneo con el flujo relativo se observa que al usar la aproximación de flujo homogéneo la velocidad relativa entre la velocidad del gas y del líquido es cero, lo que quiere decir que estas dos velocidades son iguales, mientras que al usar flujo homogéneo se tiene un aumento de la fracción vacío en veintiséis por ciento con respecto a los parámetros de flujo relativo.

La principal diferencia entre el uso de la aproximación de flujo homogéneo y flujo relativo está relacionada a los parámetros de distribución, donde la velocidad de arrastre es cero y el parámetro de distribución es uno, se da una reducción en la temperatura del líquido en cero punto quince grados Kelvin y la del gas en cero punto cuarenta grados Kelvin.

Con los resultados se puede observar que al tener una menor presencia de burbujas se tiene una temperatura del gas y líquido en el reactor nuclear, además de que las burbujas son usadas para extraer los productos de fisión insolubles.

Cuando existe transferencia de calor (no equilibrio termodinámico) entre el combustible líquido y el gas, habrá una expansión térmica en la burbuja con ello un aumento de volumen y como consecuencia una mayor fracción vacío.

Todo esto contesta las preguntas de investigación que se hicieron

Después de hacer el acoplamiento de la cinética neutrónica, transferencia de calor y el sistema de flujo en dos fases se puede concluir que es mejor tener tiempos τ_C más grandes de circulación del combustible líquido en el núcleo del reactor que en el lazo externo, y con ello se tiene un aumento de cero punto cinco por ciento en la fracción vacío y un aumento del veintiocho cm^{-3} en la concentración de precursores además de un aumento de temperaturas del combustible líquido en seis grados Kelvin y del gas en un cinco punto ocho grados Kelvin usando un tiempo de 8s en τ_C .

Con todo esto se puede decir que lo mejor sería usar mayor tiempo τ_C que es el tiempo que tarda en circular el combustible líquido en el núcleo del reactor y tener un tiempo τ_L menor para que el combustible líquido circule en el lazo externo, se tendría mayor potencia, fracción vacío y concentración de precursores.

Referencias.

- Ansto. (2021). The evolution of molten salt reactors. <https://www.ansto.gov.au/our-science/nuclear-fuel-cycle/advanced-nuclear-reactors/evolution-of-molten-salt-reactors>.
- Allibert, M., Aufiero, M., Brovchenko, M., Delpech, S., Ghetta, V., Heuer, D., Laureau, A. & Merle-Lucotte, E. (2016). Molten Salt Fast Reactors. In I. L. Pioro. (Ed.), Handbook of Generation IV Nuclear Reactors (pp. 157-158). United Kingdom: Woodhead Publishing
- Aufiero, M., Cammi, A., Geoffroy, O., Losa, M., Luzzi, L., Ricotti, M. E., & Rouch, H. (2014). Development of an OpenFOAM model for the Molten Salt Fast Reactor transient analysis. *Chemical Engineering Science*, 111, 390-401.
- Bajpai, P., Lorenzi, S., & Cammi, A. (2020). A multiphysics model for analysis of inert gas bubbles in Molten Salt Fast Reactor. *The European Physical Journal Plus*, 135(6), 409.
- Betzler, B. R., Powers, J. J., & Worrall, A. (2017). Molten salt reactor neutronics and fuel cycle modeling and simulation with SCALE. *Annals of Nuclear Energy*, 101, 489-503.
- Capelli, E. (2012). Thermodynamic characterization of salt components for molten salt reactor fuel.
- Capelli, E., Beneš, O., & Konings, R. J. M. (2014). Thermodynamic assessment of the LiF–NaF–BeF₂–ThF₄–UF₄ system. *Journal of Nuclear Materials*, 449(1-3), 111-121.
- Cervi, E., Lorenzi, S., Luzzi, L., & Cammi, A. (2019b). Multiphysics analysis of the MSFR helium bubbling system: A comparison between neutron diffusion, SP3 neutron transport and Monte Carlo approaches. *Annals of Nuclear Energy*, 132, 227-235.
- de Boed, G. (2018). Extraction of noble metals in a molten salt reactor by helium bubbling (Doctoral dissertation, Delft University of Technology).
- Dinamik, E. T. R. D. O. (2019). A new solution approach for the nonlinear dynamic model of molten salt reactors. *Turkish Journal of Nuclear Science*, 31(2)

Diniz, R. C., da Cruz Gonçalves, A., & da Rosa, F. S. D. S. (2020). Neutron point kinetics model with precursors' shape function update for molten salt reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 360, 110466.

DoE, U. S. (2002). A Technology Roadmap for Generation IV nuclear energy systems. http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.

Dolan, T. J. (Ed.). (2017). *Molten salt reactors and thorium energy*. Woodhead Publishing.

Domínguez Alfaro Jesús Jorge (2020). *Cinética neutrónica de un Reactor de Sales Fundidas*. UAM Iztapalapa.

Duderstadt, J. J., & Hamilton, L. J. (1976). *Nuclear Reactor Analysis*, JohnWiley & Sons. Inc., New York.

Du, B. C., He, Y. L., Wang, K., & Zhu, H. H. (2017). Convective heat transfer of molten salt in the shell-and-tube heat exchanger with segmental baffles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 456-465.

Espinosa-Paredes G., Domínguez-Alfaro J., Espinosa-Martínez E.-G., Vázquez-Rodríguez A. (2021). Time Constant Effects for Fluid-fueled Molten Salt Reactors. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 16(22).

Espinosa-Paredes, G., & Rodríguez, R. V. (2016). *Física de reactores nucleares I: Un enfoque conceptual*. OmniaScience.

Forsberg, C.W.; Peterson, P.F. & Pickard, P.S. (2003). Molten-Salt-Cooled Advanced High-Temperature Reactor for Production of Hydrogen and Electricity. *Nuclear Technology*, Vol.144, No.3, (December 2003), pp. 289-302, ISSN 0029-5450

Gérardin, D., Allibert, M., Heuer, D., Laureau, A., Merle-Lucotte, E., & Seuvre, C. (2017). Design evolutions of the molten salt fast reactor.

Gonçalves, L. C., Maiorino, J. R., Monteiro, D. B., & Rossi, P. C. (2019). A review of thorium utilization in Molten Salt Reactors: concepts, technology and calculation methodologies. In *Proceedings of the INAC 2019: international nuclear atlantic conference*. Nuclear new horizons: fueling our future.

- Greenwood, M. S., Betzler, B. R., Qualls, A. L., Yoo, J., & Rabiti, C. (2020). Demonstration of the Advanced Dynamic System Modeling Tool TRANSFORM in a Molten Salt Reactor Application via a Model of the Molten Salt Demonstration Reactor. *Nuclear Technology*, 206(3), 478-504.
- Ishii, M. (1977). One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes, ANL-77-47, Argonne National Laboratory, Argonne.
- Jamison, Renae. 2014. Thorium. Chemical Properties, Uses and Environmental Effects. Nova.
- Jiménez Balbuena Zaira Itzel (2021). Transferencia de calor en un reactor nuclear de sales fundidas con efectos de inyección de burbujas. PEMA UAM Iztapalapa.
- Luzzi, L., Aufiero, M., Cammi, A., & Fiorina, C. (2012). Thermo-hydrodynamics of internally heated molten salts for innovative nuclear reactors. *Hydrodynamics-Theory and Model*, InTech, 119e142.
- Merle-Lucotte, E., Mathieu, L., Heuer, D., Ghetta, V., Brissot, R., Brun, C. L., & Liatard, E. (2008). Influence of the processing and salt composition on the thorium molten salt reactor. *Nuclear Technology*, 163(3), 358-365.
- Muránsky, O., Yang, C., Zhu, H., Karatchevtseva, I., Sláma, P., Nový, Z., & Edwards, L. (2019). Molten salt corrosion of Ni-Mo-Cr candidate structural materials for Molten Salt Reactor (MSR) systems. *Corrosion Science*, 108087.
- Pázsit, I., Dykin, V., & Sanchez, R. (2014). The point kinetic component of neutron noise in an MSR. *Annals of Nuclear Energy*, 64, 344-352.
- Ramírez, J. L. (2018). Intensificación de la transferencia de calor en ebullición convectiva. *Avances Investigación en Ingeniería*, 15(1), 86-102.
- Rubiolo, P. R., Retamales, M. T., Ghetta, V., & Giraud, J. (2017). High temperature thermal hydraulics modeling of a molten salt: Application to a molten salt fast reactor (MSFR). *ESAIM: Proceedings and Surveys*, 58, 98-117.

- Rykhlevskii, A., Bae, J. W., & Huff, K. D. (2019). Modeling and simulation of online reprocessing in the thorium-fueled molten salt breeder reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 128, 366-379.
- Singh, V., Wheeler, A. M., Upadhyaya, B. R., Chvála, O., & Greenwood, M. S. (2020). Plant-level dynamic modeling of a commercial-scale molten salt reactor system. *Nuclear Engineering and Design*, 360, 110457.
- Wooten, D., & Powers, J. J. (2018). A review of molten salt reactor kinetics models. *Nuclear Science and Engineering*, 191(3), 203-230.
- Yoshiok, R., Kinoshita, M. and Scott, I. (2017). Materials. In: T. olan (Ed.) *Molten Salt Reactors and Thorium Energy* (pp. 189-193). Woodhead Publishing: United Kingdom.
- Zarei M. (2017), "Nonlinear dynamics and control in molten salt reactors. March 31, 2018. *Nuclear Engineering and Design*.
- Zhang, D., Rineiski, A., Wang, C., Guo, Z., Xiao, Y., & Qiu, S. (2015). Development of a kinetic model for safety studies of liquid-fuel reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 81, 104-112.
- Zuber, N. (1963). Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similarity with natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 6(1), 53-78.
- Foro nuclear (2021). Foro de la Industria Nuclear Española. <https://www.foronuclear.org/recursos/infografias/generaciones-de-reactores-nucleares/>. Consultado en octubre de 2021.

Apéndice A

Teoría de flujos relativos

La teoría de flujos relativos (Zuber, 1963) establece que la velocidad superficial del gas se puede establecer con la siguiente relación matemática

$$j_g = (C_0 j + v_{gj}) \varepsilon_g \quad (\text{A.1})$$

$$j_l = j - j_g \quad (\text{A.2})$$

donde la *velocidad de arrastre* v_{gj} , es la velocidad del gas relativa respecto a la velocidad superficial total

$$v_{gj} = v_g - j = (1 - \varepsilon_g) v_r \quad (\text{A.3})$$

La velocidad de arrastre es el producto de la fracción volumen de la fase líquida y la velocidad relativa, ésta definida por

$$v_r = v_g - v_l \quad (\text{A.4})$$

En régimen de flujo burbujeante, la velocidad de arrastre está con la aceleración de la gravedad, la tensión superficial del líquido y las densidades del gas y del líquido (Ishii, M., 1977):

$$v_{gj} = \sqrt{2} \left(\frac{g \sigma (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right)^{0.25} \quad (\text{A.5})$$

Esta relación se puede aplicar cuando la viscosidad de la fase gas es muy pequeña respecto a la viscosidad de la fase líquida: $\mu_g \ll \mu_l$.

El *parámetro de distribución* C_0 depende implícitamente de la presión, geometría del sistema, la relación de densidades y el número de Reynolds (Ishii, M., 1977):

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (\text{A.6})$$

Apéndice B

Modelo de transferencia de calor mejorado para combustible líquido.

$$\begin{aligned}
 & (\rho Cp)_\ell \varepsilon_\ell \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial t} - (\rho Cp)_\ell \langle T_\ell \rangle^\ell \frac{\partial \varepsilon_\ell}{\partial t} + (\rho Cp)_\ell \nabla \cdot \left(\varepsilon_\ell \langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell \langle T_\ell \rangle^\ell \right) + k_\ell (\nabla \varepsilon_\ell) \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell = \\
 & \nabla \cdot \left[\mathbf{K}_{\ell\ell} \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell + \mathbf{K}_{\ell g} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g \right] + \mathbf{u}_{\ell\ell} \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell + \mathbf{u}_{\ell g} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g - a_v h \left(\langle T_\ell \rangle^\ell - \langle T_g \rangle^g \right) + \varepsilon_\ell \langle q_\ell^m \rangle^\ell
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

Análisis de unidades

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\left(\frac{\rho}{\text{kg}} \frac{Cp}{\text{J}} \right)_\ell \underbrace{\varepsilon_\ell}_{(-)} \underbrace{\frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial t}}_{\frac{K}{s}}}_{\frac{W}{m^3}} - \underbrace{\left(\frac{\rho}{\text{kg}} \frac{Cp}{\text{J}} \right)_\ell \langle T_\ell \rangle^\ell \frac{\partial \varepsilon_\ell}{\partial t}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\left(\frac{\rho}{\text{kg}} \frac{Cp}{\text{J}} \right)_\ell \frac{\nabla \cdot \left(\varepsilon_\ell \langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell \langle T_\ell \rangle^\ell \right)}{\frac{1}{m}}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\frac{k_\ell}{mK} \left(\frac{\nabla \varepsilon_\ell}{m} \right) \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell}_{\frac{W}{m^3}} = \\
 & \underbrace{\frac{\nabla \cdot \left(\mathbf{K}_{\ell\ell} \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell \right)}{\frac{1}{m}}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\frac{\nabla \cdot \left(\mathbf{K}_{\ell g} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g \right)}{\frac{1}{m}}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\frac{\mathbf{u}_{\ell\ell} \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell}{\frac{W}{m^2 K}}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\frac{\mathbf{u}_{\ell g} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g}{\frac{W}{m^2 K}}}_{\frac{W}{m^3}} - \underbrace{\frac{a_v h \left(\langle T_\ell \rangle^\ell - \langle T_g \rangle^g \right)}{m^3 K}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\frac{\varepsilon_\ell \langle q_\ell^m \rangle^\ell}{(-) \frac{W}{m^3}}}_{\frac{W}{m^3}}
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

El modelo en coordenadas cilíndricas

$$\begin{aligned}
 & (\rho Cp)_\ell \varepsilon_\ell \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial t} - (\rho Cp)_\ell \langle T_\ell \rangle^\ell \frac{\partial \varepsilon_\ell}{\partial t} + (\rho Cp)_\ell \left(\frac{\partial \left(\varepsilon_\ell v_{\ell r} \langle T_\ell \rangle^\ell \right)}{\partial r} + \frac{\partial \left(\varepsilon_\ell v_{\ell \theta} \langle T_\ell \rangle^\ell \right)}{\partial \theta} + \frac{\partial \left(\varepsilon_\ell v_{\ell z} \langle T_\ell \rangle^\ell \right)}{\partial z} \right) + \\
 & k_\ell \left(\frac{\partial \varepsilon_\ell}{\partial r} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon_\ell}{\partial \theta} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial \theta} + \frac{\partial \varepsilon_\ell}{\partial z} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(K_{\ell\ell rr} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(K_{\ell\ell \theta\theta} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{\ell\ell zz} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial z} \right) + \\
 & \frac{\partial}{\partial r} \left(K_{\ell g rr} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(K_{\ell g \theta\theta} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{\ell g zz} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) + u_{\ell\ell rr} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial r} + u_{\ell\ell \theta\theta} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial \theta} + u_{\ell\ell zz} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial z} + \\
 & u_{\ell g rr} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial r} + u_{\ell g \theta\theta} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial \theta} + u_{\ell g zz} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} - a_v h \left(\langle T_\ell \rangle^\ell - \langle T_g \rangle^g \right) + \varepsilon_\ell \langle q_\ell^m \rangle^\ell
 \end{aligned} \tag{B.3}$$

Apéndice C

Modelo de transferencia de calor mejorado para helio burbujeante.

$$(\rho Cp)_g \varepsilon_g \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial t} - (\rho Cp)_g \langle T_g \rangle^g \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + (\rho Cp)_g \varepsilon_g \nabla \cdot (\langle \mathbf{v}_g \rangle^g \langle T_g \rangle^g) + k_g (\nabla \varepsilon_g) \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g = \quad (C.1)$$

$$\nabla \cdot [\mathbf{K}_{gg} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g + \mathbf{K}_{g\ell} \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell] + \mathbf{u}_{gg} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g + \mathbf{u}_{g\ell} \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell - a_v h (\langle T_g \rangle^g - \langle T_\ell \rangle^\ell)$$

Análisis de unidades

$$\underbrace{\left(\frac{\rho}{m^3} \frac{Cp}{kgK} \right)_g \varepsilon_g \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial t}}_{\frac{W}{m^3}} - \underbrace{\left(\frac{\rho}{m^3} \frac{Cp}{kgK} \right)_g \langle T_g \rangle^g \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\left(\frac{\rho}{m^3} \frac{Cp}{kgK} \right)_g \varepsilon_g \frac{\nabla \cdot (\langle \mathbf{v}_g \rangle^g \langle T_g \rangle^g)}{(-) \frac{1}{m}}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\left(\frac{k_g}{mK} \frac{\nabla \varepsilon_g}{\frac{1}{m} (-)} \right) \cdot \frac{\nabla \langle T_g \rangle^g}{\frac{1}{m} K}}_{\frac{W}{m^3}} =$$

$$\underbrace{\frac{\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}_{gg}}{\frac{W}{mK}} \cdot \frac{\nabla \langle T_g \rangle^g}{\frac{1}{m} K} \right)}{\frac{W}{m^3}}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\frac{\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}_{g\ell}}{\frac{W}{mK}} \cdot \frac{\nabla \langle T_\ell \rangle^\ell}{\frac{1}{m} K} \right)}{\frac{W}{m^3}}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\frac{\mathbf{u}_{gg} \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g}{\frac{W}{m^2 K}}}_{\frac{W}{m^3}} + \underbrace{\frac{\mathbf{u}_{g\ell} \cdot \nabla \langle T_\ell \rangle^\ell}{\frac{W}{m^2 K}}}_{\frac{W}{m^3}} - \underbrace{\frac{a_v h (\langle T_g \rangle^g - \langle T_\ell \rangle^\ell)}{\frac{W}{m^3 K}}}_{\frac{W}{m^3}} \quad (C.2)$$

El modelo en coordenadas cilíndricas

$$(\rho Cp)_g \varepsilon_g \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial t} - (\rho Cp)_g \langle T_g \rangle^g \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + (\rho Cp)_g \varepsilon_g \left(\frac{\partial v_{gr} \langle T_g \rangle^g}{\partial r} + \frac{\partial v_{g\theta} \langle T_g \rangle^g}{\partial \theta} + \frac{\partial v_{gz} \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) +$$

$$k_g \left(\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial r} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial \theta} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial \theta} + \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial z} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(K_{grr} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(K_{g\theta\theta} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial \theta} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K_{gzz} \frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(K_{g\ell rr} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(K_{g\ell \theta\theta} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{g\ell zz} \frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial z} \right) + \mathbf{u}_{grr} \left(\frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial r} \right) +$$

$$\mathbf{u}_{g\theta\theta} \left(\frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial \theta} \right) + \mathbf{u}_{gzz} \left(\frac{\partial \langle T_g \rangle^g}{\partial z} \right) + \mathbf{u}_{g\ell rr} \left(\frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial r} \right) + \mathbf{u}_{g\ell \theta\theta} \left(\frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial \theta} \right) + \mathbf{u}_{g\ell zz} \left(\frac{\partial \langle T_\ell \rangle^\ell}{\partial z} \right) - a_v h (\langle T_g \rangle^g - \langle T_\ell \rangle^\ell) \quad (C.3)$$

Apéndice D.

Densidad y Calor Especifico

La densidad del gas y del líquido disminuyen por influencia de la temperatura del gas y del líquido respectivamente como se observa en la [Tabla 43](#) siguiente y en la [Figura 39](#).

Tabla 43. Densidades

j_g [m/s] = 0.02607

	Entrada	Salida
ρ_g [kg/m ³]	0.1042	0.0941
ρ_l [kg/m ³]	4168.18	4080.63

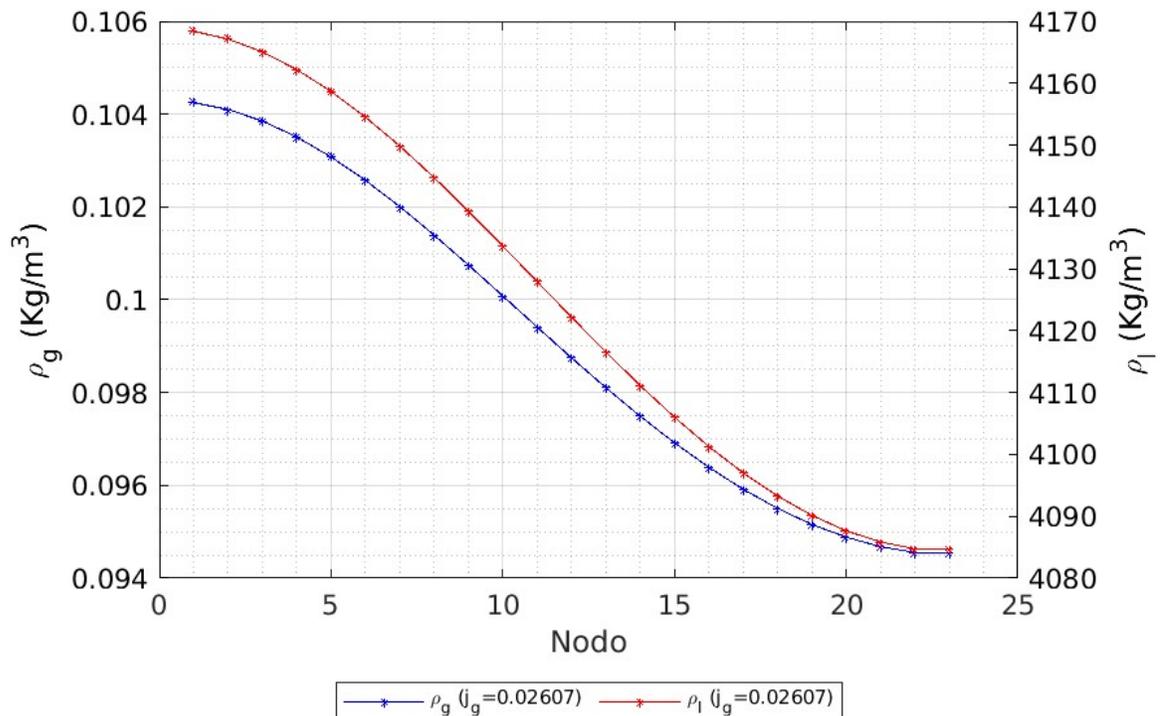


Figura 39. Distribución de densidad.

El Calor específico del gas se mantiene constante y la del líquido aumenta de con respecto a la temperatura como se muestra en la [Tabla 44](#) y en la [Figura 40](#).

Tabla 44. Calor específico

$$j_g [\text{m/s}] = 0.02607$$

	Entrada	Salida
Cp_g [kJ/kgK]	5192.6	
Cp_l [kJ/kgK]	1457.41	1733.35

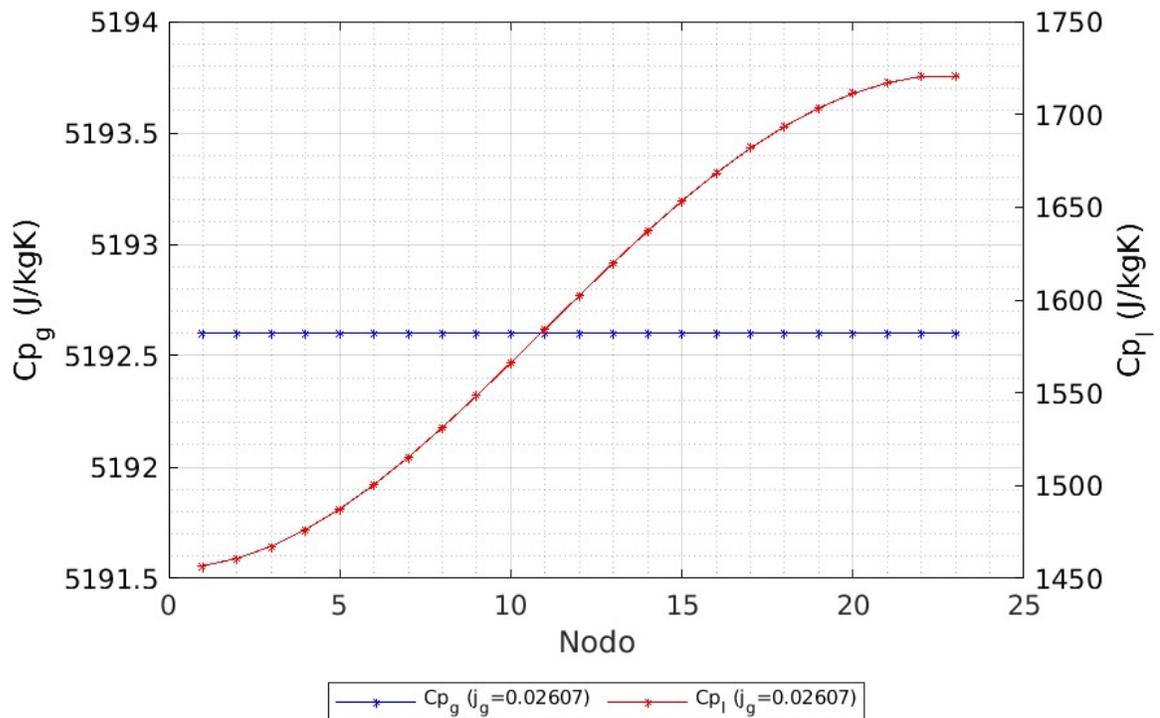


Figura 40. Distribución de calor específico.

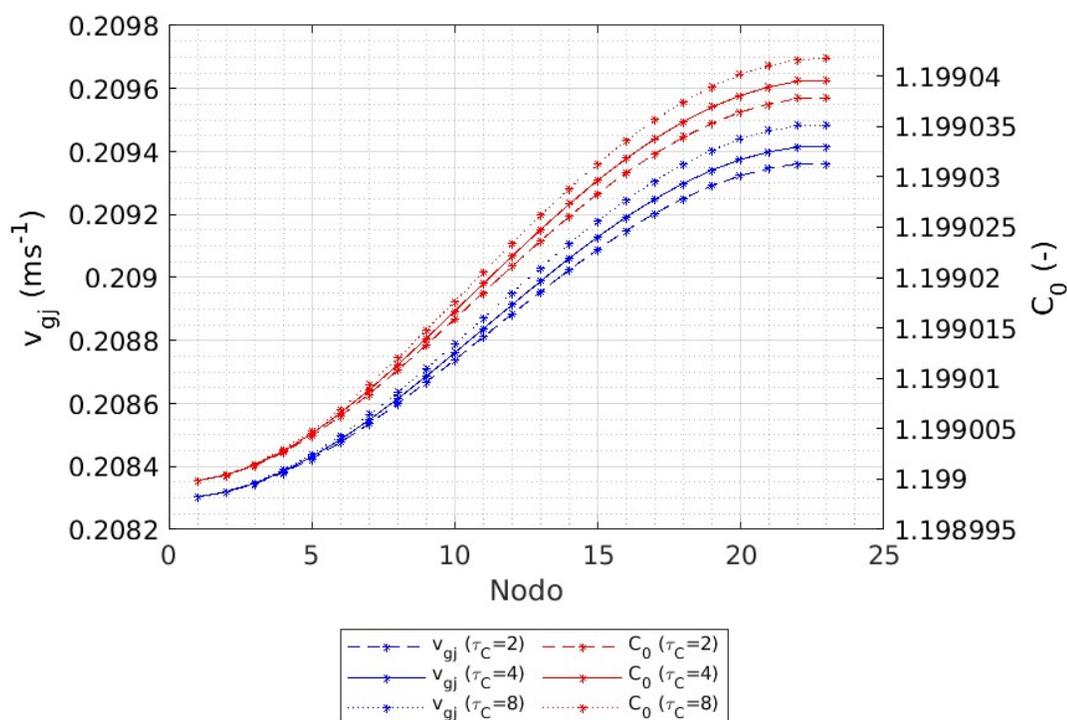
Apéndice E.

Parámetros de flujo relativo.

El parametro de distribucion y la velocidad de arrastre disminuyen con tiempos τ_C menores y aumentan respecto al valor de referencia con tiempos τ_C mayores, como se muestra en la [Figura 41](#) y [Tabla 45](#).

[Tabla 45](#). Parámetros de flujo relativo τ_L constante

$\tau_L[s] = 6$				
		$\tau_C[s] = 2$	$\tau_C[s] = 4$	$\tau_C[s] = 8$
	Entrada	Salida	Salida	Salida
v_{gj} [m/s]	0.20830	0.20936	0.20941	0.20948
C_0 [-]	1.19899	1.19903	1.19903	1.19904



[Figura 41](#). Parámetros de flujo relativo τ_L constante.

El parametro de distribucion y la velocidad de arrastre dismiuyen usando tiempos τ_L mayores al de referencia y aumentan con tiempos τ_L menores, como se muestra en la [Figura 42](#) y [Tabla 46](#).

Tabla 46. Parámetros de flujo relativos τ_C constante

		$\tau_C[s] = 4$		
		$\tau_L[s] = 3$	$\tau_L[s] = 6$	$\tau_L[s] = 12$
	Entrada	Salida	Salida	Salida
v_{gj} [m/s]	0.20830	0.20946	0.20941	0.20937
C_0 [-]	1.19899	1.19904	1.19903	1.19903

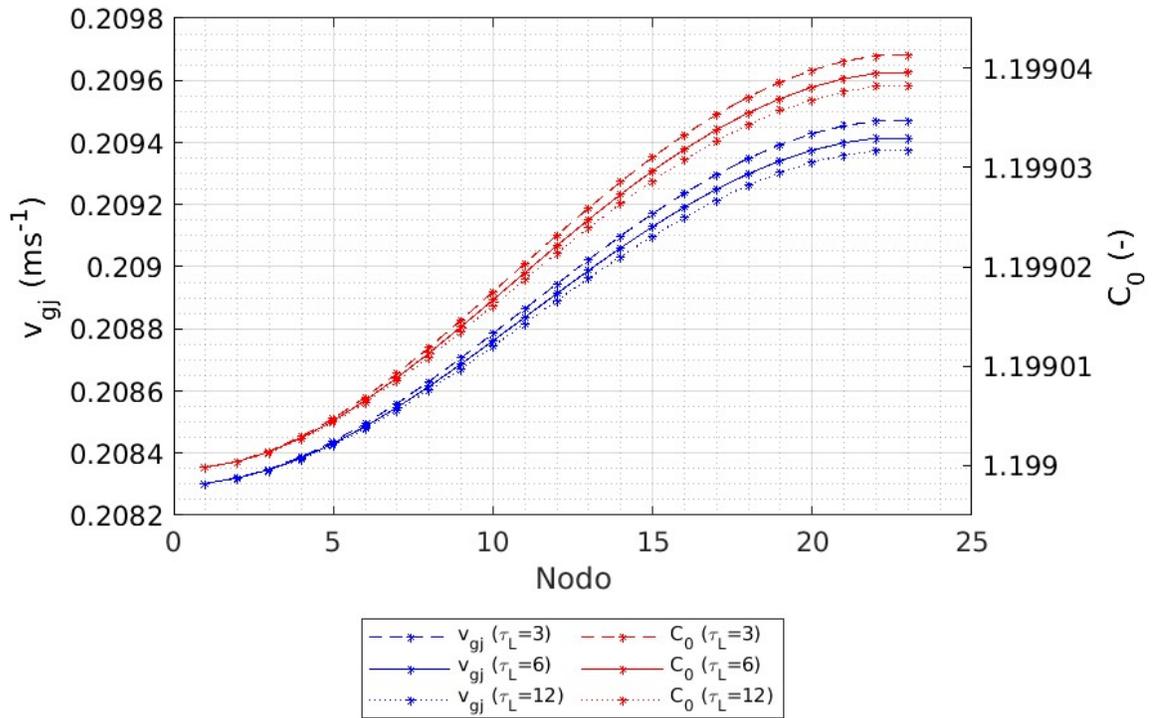


Figura 42. Parámetros de flujo relativos τ_C constante.

Apéndice F.

El perfil se muestra en la [Figura 43](#), se utiliza para el cálculo del flujo de potencia volumétrico.

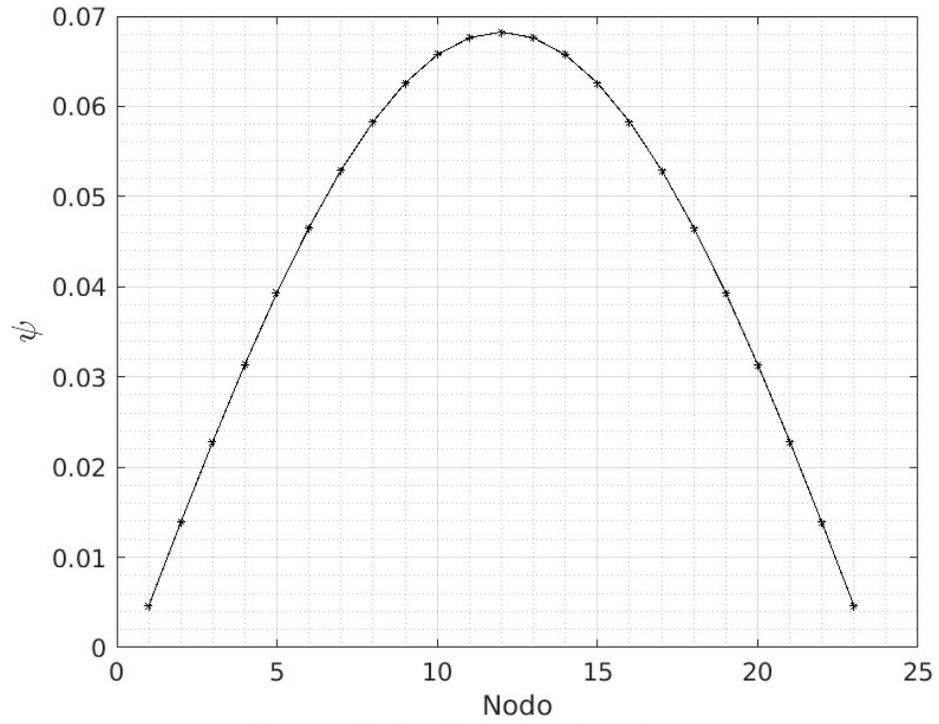


Figura 43. Perfil de distribución ψ



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00100

Matrícula: 2203802495

Flujo en dos Fases en Reactores Nucleares de Sal Fundida

En la Ciudad de México, se presentaron a las 9:00 horas del día 20 del mes de diciembre del año 2022 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. RODOLFO VAZQUEZ RODRIGUEZ
DRA. ALEJANDRIA DENISSE PEREZ VALSECA
DR. ERICK GILBERTO ESPINOSA MARTINEZ



JESUS JORGE DOMINGUEZ ALFARO
ALUMNO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: JESUS JORGE DOMINGUEZ ALFARO

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

A PROBADO

REVISÓ

MTRA. ROSALIA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. ROMAN LINARES ROMERO

PRESIDENTE

DR. RODOLFO VAZQUEZ RODRIGUEZ

VOCAL

DRA. ALEJANDRIA DENISSE PEREZ VALSECA

SECRETARIO

DR. ERICK GILBERTO ESPINOSA MARTINEZ