





Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

MODELADO Y SIMULACION DE UN TRANSFORMADOR TERMICO POR ABSORCION CON COMPONENTES DUPLEX

Tesis profesional para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Presenta

Ernesto Rosas Cortez

Directores de tesis

Dr. David Juárez Romero / Dr. Armando Huicochea Rodríguez

Cuernavaca, Mor. **Mayo, 2025**

ABSTRACT

This model evaluates the multivariate behaviour of duplex components of an Absorption Heat Transformer in the dynamic state. The process streams within the duplex components consist of an aqueous lithium bromide solution, which exchanges heat with the service streams via a falling film. The physical properties, mass and energy balances, heat and mass transfer equations, and thermodynamic equations of state define a mathematical model, which is codified using the equation-oriented programming language Modelica. Finally, the results are compared with experimental databases, showing a good correlation.

RESUMEN

El presente modelo evalúa el comportamiento multivariable de un Transformador Térmico por Absorción conformado por dos componentes dúplex. Las corrientes de proceso dentro de los componentes dúplex consisten en una solución acuosa de bromuro de litio, que intercambia calor con las corrientes de servicio mediante película descendente. Las propiedades físicas, los balances de masa y energía, las ecuaciones de transferencia de calor y masa, y las ecuaciones de estado termodinámicas definen un modelo matemático, que se codifica a través del lenguaje de programación orientado a ecuaciones Modelica. Finalmente los resultados se comparan con base de datos experimental, mostrando buena correlación.

Dedicatoria

Para Julia

Con todo mi cariño

Ernesto

Agradecimientos

Agradecer primero a Dios por su infinita misericordia. Agradecer a mis padres, Guillermo y en especial a Julia, quien me ha acompañado en este viaje. También quiero expresar mi agradecimiento a mis hermanos Jesús Abraham y Osvaldo por apoyarme y alentarme en seguir adelante. Mi eterno agradecimiento a mi director de tesis, Dr. David Juárez por su amabilidad, paciencia y todo el apoyo que me ha brindado desde el primer día. Le doy gracias también a mi director de tesis, Dr. Armando Huicochea por sus consejos, y al equipo del laboratorio de térmica aplicada:

- Dr. Javier Delgado
- Dr. Tabbaí Torres
- Dr. Luis Adrián López

Gracias a la Dra. Susana Silva, Dr. Alberto Gallegos, Dr. Gonzálo González y al Dr. José Alfredo Hernández por sus amenas y agradables conversaciones. Me gustaría agradecer también al Dr. Victor Velázquez y a la Dra. Miriam Navarrete por recomendarme al CIICAp e impulsarme a estudiar la maestría. También agradecezco al Dr. Isaac Canela por su orientación y apoyo, de gran ayuda en la culminación de la presente tesis. Mi reconocimiento y agradecimiento a mis amigos y compañeros en esta travesía: Marco Polo Ortelli, Cristian Joani, Camilo Zapata, Jorge Misael, Jorge Carbajal, Jorge Arenas, Athenas, Dante y todas las personas que han formado parte de mi vida académica y profesional. Finalmente agradecer a mis amigos de toda la vida, Patricia y Emiliano por ser parte y brindarme su amistad a lo largo de tantos años.

Índice

Nomenclatura **10**

1. INTRODUCCIÓN **12**

1.1. JUSTIFICACIÓN . . . 12
1.2. HIPÓTESIS . . . 12
1.3. OBJETIVOS . . . 13
1.3.1. GENERAL . . . 13
1.3.2. ESPECÍFICOS . . . 13
1.4. ESTADO DEL ARTE . . . 13
1.5. MARCO TEÓRICO . . . 15
1.5.1. PROPIEDADES FÍSICAS . . . 15
1.5.2. PARÁMETROS DE DISEÑO . . . 16
1.5.3. BALANCES DE MATERIA . . . 16
1.5.4. BALANCES DE ENERGÍA . . . 17
1.5.5. ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA . . . 17
1.5.6. ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR . . . 17

2. DESCRIPCIÓN DEL TTA **18**

2.1. CORRIENTES DE FLUJO EN EL TTA . . . 18
2.2. OPERACIONES UNITARIAS DEL TTA . . . 18
2.3. GEOMETRÍA DEL TTA . . . 20

3. MODELO MATEMÁTICO **23**

3.1. PROPIEDADES FÍSICAS . . . 23
3.2. SUPOSICIONES EN EL MODELO . . . 23
3.3. GENERADOR . . . 26
3.3.1. BALANCES DE MATERÍA Y ENERGÍA . . . 26
3.3.2. ECUACIóN DE GAS IDEAL . . . 28
3.3.3. ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR . . . 28
3.3.4. EQUILIBRIO TERMODINÁMICO . . . 28
3.4. CONDENSADOR . . . 30
3.5. EVAPORADOR . . . 32
3.6. ABSORBEDOR . . . 34
3.7. ECONOMIZADOR (INTERCAMBIADOR DE CALOR DE SOLUCIONES DE LiBr) . . . 36
3.8. GENERADOR - CONDENSADOR . . . 37
3.9. EVAPORADOR - ABSORBEDOR . . . 37
3.10. COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR . . . 37

4. AMBIENTE DE MODELADO **41**
4.1. MODELADO DE UN SISTEMA FÍSICO . . . 42
4.2. MODELADO DE COMPONENTES DÚPLEX . . . 43
4.2.1. CONNECT . . . 44
4.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS . . . 44
4.2.3. FUNCIONES EXTERNAS . . . 44
4.3. MODELADO DE CICLOS DE ABSORBCIÓN . . . 44

5. RESULTADOS **45**
5.1. GENERADOR - CONDENSADOR . . . 45
5.2. EVAPORADOR - ABSORBEDOR . . . 47

6. CONCLUSIONES **50**
6.1. GENERADOR - CONDENSADOR . . . 50
6.2. EVAPORADOR - ABSORBEDOR . . . 50
6.3. CICLO TTA . . . 51

7. RECOMENDACIONES **51**

A. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA **55**

B. DESARROLLO DE ECUACIÓN DE ENERGÍA **56**

C. PROPIEDADES FÍSICAS **57**

D. OBTENCIÓN DE DERIVADAS MEDIANTE Symbolics.jl **60**

E. PRESIÓN EN UN COMPONENTE DÚPLEX **61**

F. MÉTODOS NUMÉRICOS **62**
F.1. ECUACIONES NO LINEALES . . . 62
F.2. ECUACIONES DIFERENCIALES ORDINARIAS (ODE) . . . 62
F.3. MÉTODOS PARA SISTEMAS DE ECUACIONES DIFERENCIALES ORDINARIAS . . . 63
F.4. MÉTODOS PARA SISTEMAS DE ECUACIONES ALGEBRAICO - DIFERENCIAL (DAE) . . . 64

G. AMBIENTE DE MODELADO *OpenModelica Connection Editor* **66**

H. CÓDIGOS FUENTES **69**

Índice de figuras

1. Procedimiento para construcción de modelo . . . 14
2. Diagrama esquematico del TTA . . . 19
3. Intensificación de procesos en el TTA. [Delgado-Gonzaga, 2018] . . . 20
4. Diagrama *presión - temperatura* del TTA después de *intensificación* de *evaporación - absorción* y *desorbción - condensación*. . . . 21
5. Desorción de vapor en el generador por película descendente. . . . 26
6. Condensación de refrigerante mediante película descendente . . . 30
7. Evaporación de refrigerante . . . 32
8. Absorción de vapor en absorbedor . . . 34
9. Comportamiento dinámico del vapor desorbido en el *generador* . . . 46
10. Comportamiento dinámico de la temperatura T^o_{hw} . . . 46
11. Presión en la cámara del componente dúplex *evaporador - absorbedor* . . . 48
12. Fracción másica de LiBr en película descendente del *absorbedor* . . . 48
13. Potencia térmica del *absorbedor* . . . 49
14. Comparación de la presión experimental y simulada en la cámara evaporador - absorbedor. . . . 49
15. Comparación de la presión experimental y simulada en la cámara evaporador - absorbedor. . . . 50
16. Sistema de volúmenes A y B . . . 61
17. Creación de un nuevo modelo en *Modelica* . . . 66
18. Asignación de nombre al modelo . . . 66
19. Vista de diagrama en *Modelica* . . . 66
20. Modelado en OMEdit - OpenModelica Connection Editor . . . 67
21. Ejemplo de cómo guardar el modelo en Modelica. . . . 67
22. Verificación del modelo. . . . 67
23. Verificación exitosa del modelo en Modelica . . . 68
24. Configuracion de simulación en Modelica . . . 68
25. Resultados de la simulación para $t = [0, 10]$ segundos . . . 68

Índice de tablas

1. Metodologías de modelado 15
2. Procesos internos del TTA 18
3. Geometría del componente dúplex Evaporador - Absorbedor. [Delgado-Gonzaga, 2018] 21
4. Geometría del componente dúplex generador - condensador [Delgado-Gonzaga, 2018]. 22
5. Comparación de características de diferentes modelos reportados con el modelo actual 25
6. Coeficientes convectivos de transferencia de calor. 39
7. Variables en modelo computacional 43
8. Comparación de resultados numéricos y experimentales para el componente dúplex *generador - condensador* 45
9. Comparación de resultados numéricos y experimentales para el componente dúplex *evaporador - absorbedor* 47
10. Funciones termodinámicas 57
11. Coeficientes para la correlación de propiedades de LiBr acuoso [Yuan and Herold, 2005] 59
12. Constantes para la correlación de viscosidad dinámica (C.0.7) 59

Índice de códigos

1. Modelado del Absorbedor 69
2. Modelado del Evaporador 72
3. Modelado del componente Dúplex Evaporador - Absorbedor 74
4. Modelado del generador 75
5. Modelado del condensador 78
6. Código en lenguaje C para obtención de entalpía de solución LiBr a partir de $h_{LiBr} = h(x, T, P)$ . . 80
7. Código en lenguaje C para obtención de $\frac{\partial h}{\partial x} = f(x, T, P)$ 81
8. Código en lenguaje C para obtención de la densidad de solución LiBr a partir de $\rho_{LiBr} = \rho(x, T, P)$ 82
9. Código en lenguaje C para obtención de la concentración de LiBr a partir de $\mu^v_{H_2O} = \mu^l_{H_2O}$ 83
10. Código en lenguaje C para obtención de la temperatura de equilibrio de LiBr a partir de $\mu^v_{H_2O} = \mu^l_{H_2O}$ 85
11. Función para obtención de la densidad de solución LiBr acuosa (Modelica) 87
12. Función para la obtención de la viscosidad dinámica de solución LiBr acuosa (Modelica) 88
13. Función para el cálculo del espesor del película (Modelica) 89

Nomenclatura

Romanos

$\dot{Q}$	Potencia térmica [kW]
$\dot{W}$	Potencia [kW]
A	Área [m^2]
Cp	Calor específico isobárico [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
g	Constante aceleración gravitacional = 9.81 $m \cdot s^{-1}$, en ecuación (3.3.5)
g	Función energía libre de Gibbs [$kJ \cdot kg^{-1}$]
h	Entalpía [$kJ \cdot kg^{-1}$]
k	Coeficiente global de transferencia de calor [$kW \cdot m^{-2} K^{-1}$]
L	Longitud del tubo [m]
M	Masa [kg]
P	Presión [kPa]
s	Entropía [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
T	Temperatura [K]
t	Tiempo [s]
U	Energía interna [kJ]
u	Energía interna específica [$kJ \cdot kg^{-1}$]
V	Volumen [m^3]
x	Fracción másica [$kg \cdot kg^{-1}$]
$\dot{m}$	Flujo másico [$kg \cdot s^{-1}$]

Subíndices

cs	Solución concentrada
cw	Agua de enfriamiento
ds	Solución diluida
flm	Película
hw	Agua de calentamiento
l	Líquido
mix	Mezcla líquido - vapor
tub	Tubo
v	Vapor
wll	Pared
H_2O	Agua

Griegos

δ	Espesor de película descendente promedio [m]
ϵ	Error [$kg \cdot kg^{-1}$]
Γ	Flujo másico por longitud de tubo [$kg \cdot s^{-1} m^{-1}$]

κ	Conductividad térmica [$W \cdot m^{-1} K^{-1}$]
λ	Coeficiente convectivo de transferencia de calor [$kW \cdot m^{-2} K^{-1}$]
μ	Potencial químico [$kJ \cdot kg^{-1}$]
μ	viscosidad dinámica [Pa·s] en ecuación (3.3.5)
ρ	Densidad [$kg \cdot m^{-3}$]
τ	Tolerancia [adimensional]
θ	Ángulo [rad]
v	Volumen específico [$m^3 \cdot kg^{-1}$]

Números adimensionales

Nu	Nusselt
Pr	Prandtl
Re	Reynolds

Superíndices

abs	Absorbedor
cnd	Condensador
eco	Economizador
evp	Evaporador
gen	Generador
i	Entrada
inn	Tubo interno
l	Líquido
o	Salida
out	Tubo externo
v	Vapor

Acrónimos

LiBr	Bromuro de litio
BDF	*Backward Differentiation Formulas* (Fórmulas de diferenciación hacia atrás)
DASSL	*Differential Algebraic System Solver* (Resolvedor de Sistema de Ecuaciones Algebraico-Diferencial)
IAPWS-97	*International Association for the Properties of Water and Steam, 1997* (Asociación Internacional para las Propiedades de Agua y Vapor, 1997)
OMEdit	*OpenModelica Connection Editor*
REPL	*Read-Eval-Print Loop*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

La adaptación al cambio climático es un desafío común. Es una tarea compartida la protección de los ecosistemas y de las formas de vida que habitan. Por consiguiente, es necesario adoptar un estilo vida, pautas de producción y consumo, que procuren el menor daño al medio ambiente posible. Por ende, en 2015 se logró el acuerdo de París, cuyo objetivo prioritario para el 2050 es lo siguiente [ONU, 2015]:
"Reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a 2 °C, y esforzarse para limitar este aumento a 1.5 °C"

Para limitar el calentamiento global a 1.5 °C, las emisiones de gases de efecto invernadero deben alcanzar su punto máximo antes de 2025 a más tardar y disminuir un 43 % para 2030.

La actividad industrial consume el 38 % de la energía total producida y emite el 47 % del CO_2 total [IEA, 2023]. La recuperación y reutilización de calor de desecho de procesos industriales disminuye la quema de combustibles fósiles y, por consiguiente, las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, el consumo de agua a nivel mundial se ha incrementado 1 % anual durante los últimos 40 años, y se estima que, a causa del crecimiento demográfico y el desarrollo socioeconómico, seguirá incrementándose a un ritmo parecido de aquí al 2050 [UNESCO, 2023]. Esta situación se acentúa por un tratamiento insuficiente de aguas.

Por estas razones, se han desarrollado *tecnologías* que pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y que simultáneamente promuevan el tratamiento de aguas.

Una forma de recuperación y reutilización de calor se puede realizar mediante bombas de calor por absorción. Adicionalmente, estos equipos se pueden configurar para desalinización de agua [Huicochea and Siqueiros, 2010]. En esta dirección, en el LITA-CIICAp se construyó un *Transformador Térmico por Absorción* (TTA) para destilación de agua. Normalmente un TTA se constituye principalmente por cuatro intercambiadores de calor para suministro y recuperación de calor. No obstante, con la finalidad de mejorar el desempeño del equipo y reducir las pérdidas asociadas al trasporte de energía y momemtum se optó por intensificar cuatro de los procesos principales en dos componentes dúplex.

Debido a la contingencia sanitaria por COVID-19, el equipo no recibió un mantenimiento adecuado, por lo cual requiere un mantenimiento mayor. Sin embargo, los experimentos en el TTA son costosos y requieren varias horas para observar los cambios en el equipo. Una forma más económica de responder preguntas sobre el equipo es mediante el uso de un modelo matemático. Si un modelo matemático es computacionalmente ejecutable, los experimentos númericos pueden generar simulaciones y optimizar la eficiencia del equipo. Simular el funcionamiento del equipo bajo diversas condiciones y configuraciones iniciales predice su comportamiento dinámico multivariable, aún para las variables que son inaccesibles en el equipo.

1.2. HIPÓTESIS

Es posible, mediante un modelo matemático computacional, identificar inconsistencias en resultados experimentales, debido a las características de la medición, pérdidas de masa, energía o variaciones ambientales.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GENERAL

Construir un modelo matemático computacional que simule el comportamiento multivariable dinámico de componentes dúplex de un TTA.

1.3.2. ESPECÍFICOS

1. Construir un modelo matemático a partir de propiedades físicas, geometría del equipo, condiciones de operación, balances de materia y energía.

2. Utilizar en el modelo matemático correlaciones adecuadas que describan los fenómenos presentes en las operaciones unitarias del TTA.

3. Codificar una forma del modelo matemático computacionalmente ejecutable, mediante un lenguaje de programación adecuado para sistemas dinámicos.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Stephan et al. [1997] desarrollaron un modelo a partir de balances de energía y especies, para un TTA que opera con la mezcla NaOH – H_2O. Este modelo simula el comportamiento dinámico del equipo a diferentes condiciones de operación y muestra buena exactitud cuando se compara con datos experimentales. Adicionalmente se demostró que el equipo alcanza coeficientes de desempeño de hasta 0.49 durante operaciones en estado estable.

Bian et al. [2005] desarrollaron un modelo a partir de balances de materia y energía para una bomba de calor por absorción que opera con la mezcla LiBr – H_2O. El modelado implicó el uso de parámetros agrupados para describir todos los componentes principales del sistema de enfriamiento. La simulación se realizó en *Simulink* utilizando un solucionador ODE 45 con una tolerancia relativa establecida en 1e-5. Además se adoptó un paso de tiempo variable, con un paso de tiempo mínimo de 0,5 segundos, para garantizar tanto la precisión como la eficiencia en el cálculo.

Fu et al. [2006] desarrollaron un modelo dinámico de una bomba de calor por absorción para enfriamiento usando Modelica. El modelo se validó con datos de pruebas obtenidos mediante perturbaciones en operaciones de estado estacionario. No obstante, el modelo no toma en cuenta las masas de los intercambiadores de calor, que son importantes para describir las respuestas transitorias.

Kohlenbach and Ziegler [2008] desarrollaron un modelo dinámico para bombas de calor por absorción para enfriamiento que trabaja con la mezcla LiBr – H_2O. El modelo se basa en balances de energía en estado estable, mientras que el comportamiento dinámico se implementa mediante almacenamiento de masa en el generador y absorbedor, almacenamiento de calor térmico en los componentes y tiempo de retardo en el ciclo de la mezcla absorbente. El sistema de ecuaciones se resolvió en MATLAB usando el procedimiento de Newton - Raphson con aproximación de la matriz jacobiana por diferencias finitas. El modelo fue verificado con datos experimentales con desviaciones dinámicas de alrededor de 10s.

Ziegler et al. [2009] desarrollaron un modelo de una bomba de calor por absorción para enfriamiento en Modelica. El enfriador opera con la solución LiBr – H_2O, con intercambiadores de calor de película descendente y en estado

estacionario. La comparación de los flujos de calor simulados difieren del 5 % al 15 % con respecto a los datos experimentales.

Marc et al. [2015] construyeron un modelo basado en balances de materia, energía y ecuaciones de transferencia de calor para una bomba de calor por absorción que opera con la mezcla LiBr – H_2O. El error absoluto entre las temperaturas de salida simuladas y medidas fue menor a 1 °C para cada componente. Los errores en los valores del COP fueron de alrededor del 6 % entre los resultados experimentales y simulados.

Ochoa et al. [2016] realizaron una análisis dinámico para una máquina de enfriamiento por absorción que opera con la mezcla LiBr – H_2O. Desarrollaron un modelo matemático basado en balances de materia, energía y especies. Además se consideran las correlaciones de los coeficientes convectivos de transferencia de calor para los intercambiadores de calor de los procesos de enfriamiento por absorción. El modelo se codificó en MATLAB y se resolvió el sistema de ecuaciones no lineales mediante diferencias finitas. Las mayores diferencias absolutas al validar el modelo fueron 1.0 °C, 0.7 °C y 0.2 °C para agua caliente, refrigerada y fría, respectivamente. En términos de error relativo, estas divergencias representan un máximo del 5 % y un mínimo del 0.3 %.

Canela-Sánchez [2020] desarrolló un modelo matemático a partir de balances de materia, energía y especies de un TTA que opera con la solución LiBr – H_2O. El modelo se codificó en gPROMS y realizó una estimación de parámetros para mejorar la exactitud de los resultados. Los parámetros estimados fueron el factor de la válvula del evaporador - absorbedor y el Reynolds onset. Los errores de las variables medibles en estado estacionario oscilan entre 0.22 % y 13.83 %, y solo tres variables presentan errores superiores al 6.13 %.

Alarcón-Gálvez et al. [2004] proponen una metodología para la construcción y simulación de sistemas dinámicos a partir de los fenómenos físicos involucrados dentro de los procesos. Esta secuencia puede visualizarse en la figura 1:

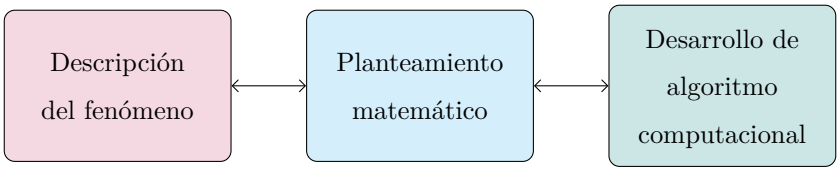


Figura 1: Procedimiento para construcción de modelo

OpenModelica es un entorno integrado y de código abierto a gran escala para modelado, simulación y optimización. El entorno se basa en el lenguaje Modelica, orientado a objetos y basado en ecuaciones. Además, el entorno OpenModelica ofrece diversas funciones, como depuración, optimización, visualización y animación 3D, edición y simulación de modelos web, codificación desde *Modelica, Python, Julia* y *Matlab*, simulación y cosimulación eficientes de modelos basados en *Functional Mock-Up Interface* (FMI), compilación para sistemas embebidos, integración con *ModelicaUML*, verificación de requisitos y generación de código paralelo para arquitecturas multinúcleo [Fritzson et al., 2022].

1.5. MARCO TEÓRICO

El modelado de sistemas termodinámicos puede clasificarse en método *empírico* y *físico* [Zhou et al., 2023]. La tabla 1 muestra el contraste entre ambas metodologías.

Tabla 1: Metodologías de modelado

	Empírico	Físico
Base	Se formulan correlaciones a partir de resultados experimentales obtenidos de sensores calibrados.	Describe el comportamiento dinámicos de los sistemas termodinámicos mediante ecuaciones gobernantes.
Suposición	Se obtienen resultados a partir de mediciones de fluidos y equipos.	Utiliza suposiciones para obtener un modelo de dimensión más tratable.
Extrapolación	Estas correlaciones pueden reutilizarse con confiabilidad en el rango en el que se realizó el ajuste.	Las variables de cada unidad se pueden obtener a partir de la resolución de ecuaciones y las variables conocidas en un rango limitado por las correlaciones y límites físicos.

En el presente trabajo se optó por un modelo físico, debido a que la base de datos experimental es limitada. El modelado se realizó a partir de:

- Modelado
  - Propiedades físicas
    - Termodinámicas $->$ Ecuaciones de estado
    - Transporte
  - Balances macroscópicos
    - Materia
    - Energía
  - Ecuaciones auxiliares
    - Transferencia de calor
    - Transferencia de masa
    - Relaciones de equilibrio termodinámico
  - Parámetros de diseño
    - Geométricos
    - Configuración de flujo
    - Materiales

A continuación, se da una breve explicación de los elementos que componen el modelo:

1.5.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Son características de la materia sin cambios en la identidad química. Las propiedades físicas puede ser clasificadas en propiedades *intensivas* y *extensivas*. Las propiedades intensivas, como el punto de ebullición y la densidad,

no dependen de la cantidad de la materia en una muestra, mientras que las propiedades extensivas, como el volumen y la masa, dependen del tamaño de la muestra.

Las propiedades físicas se pueden clasificar en

- *Termodinámicas*. Abarca a la densidad, la entalpía y la entropía.
- *Equilibrio*. Involucra a la temperatura de saturación y al potencial químico de la solución LiBr - H_2O.
- *Transporte*. Incluyen a la viscosidad y conductividad térmica

Ecuaciones de estado. Son expresiones matemáticas que relacionan las variables de estado de una sustancia, como la presión, la temperatura, el volumen y la composición, para describir su estado físico bajo ciertas condiciones establecidas. Estas ecuaciones son necesarias para predecir el comportamiento de gases, líquidos y sólidos y son ampliamente utilizadas en ingeniería de procesos. Sin embargo, ninguna ecuación de estado puede predecir con precisión las propiedades de todas las sustancias en todas las condiciones, por consiguiente la búsqueda de una ecuación de estado general sigue en curso [Kontogeorgis et al., 2020].

1.5.2. PARÁMETROS DE DISEÑO

Los parámetros de diseño dependen del sistema o fenómeno que está siendo modelado. En el actual modelo, se categorizan en:

- Geométricos. Considera al volumen de la coraza, la masa y el volumen del intercambiador de calor helicoidal y el área de transferencia de calor.
- Configuración de flujo de intercambiadores de calor. Las principales configuraciones de flujo incluyen:
  - Flujo paralelo
  - Flujo a contracorriente
  - Flujo cruzado
- Materiales. Los intercambiadores de calor están fabricados con acero inoxidable 416L. Como se verá mas adelante, para evaluar el cambio de la energía interna de la pared del tubo helicoidal, se utiliza el calor específico del acero inoxidable 416L.

1.5.3. BALANCES DE MATERIA

Contabiliza la masa de los materiales que entran y salen de un volumen de control. En un balance de materia para un sistema no reactivo, la masa total que entra a un sistema debe ser igual a la masa total que abandona el sistema mas cualquier acumulación en el sistema. Matemáticamente, se puede expresar como:

$$\text{Masa}_{\text{entra}} = \text{Masa}_{\text{sale}} + \text{Masa}_{\text{acumulada}} \tag{1.5.1}$$

Adicionalmente, los balances de materia pueden ser llevados de manera *global* o por *especie*.

1.5.4. BALANCES DE ENERGÍA

Son utilizados para analizar y diseñar procesos. Se basan en la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía no se puede crear ni destruir, solo transferir o convertir. La forma general de la ecuación del balance de energía es:

$$\text{Energía}_{\text{entra}} - \text{Energía}_{\text{sale}} + \text{Energía}_{\text{generada}} - \text{Energía}_{\text{consumida}} = \text{Energía}_{\text{acumulada}} \tag{1.5.2}$$

En el actual modelo, se hicieron balances de energía en:

- Corrientes de proceso
- Corrientes de servicio

Para mayor detalle sobre el desglose de los balances de materia y energía, vea el apéndice A

1.5.5. ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA

Describen el movimiento de masa de un lugar a otro debido al gradiente de concentración y considera los mecanismos de transferencia por difusión y convección.

1.5.6. ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Describen como los materiales responden a las cargas térmicas y mecánicas. Estas ecuaciones son necesarias para comprender el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones.

2. DESCRIPCIÓN DEL TTA

2.1. CORRIENTES DE FLUJO EN EL TTA

Como se indica en la figura 2, existen dos corrientes internas o de *proceso*. La corriente de *mezcla absorbente* se refiere a la solución acuosa de LiBr. La corriente que abandona el absorbedor e ingresa al generador es una *solución de* LiBr *diluida*, mientras que a la solución que sale del generador y entra al absorbedor es una *solución de* LiBr *concentrada*. La corriente de *refrigerante* es agua que se desorbe de la mezcla absorbente en el generador y se reincorpora a la mezcla absorbente en el absorbedor. Adicionalmente, existen cuatro corrientes externas o de *servicio*:

- Dos corrientes de calentamiento, que circulan al interior del tubo helicoidal del generador y evaporador.
- Dos corrientes de enfriamiento, que fluyen al interior del tubo helicoidal del absorbedor y condensador.

2.2. OPERACIONES UNITARIAS DEL TTA

La tabla 2 describe los ocho componentes principales que integran el ciclo del TTA, mientras que la figura 2 muestra como se conectan entre ellos.

Tabla 2: Procesos internos del TTA

Componente	**Descripción del proceso**
Generador	Se libera una cierta cantidad de vapor de agua desde la película de solución LiBr mediante agua de calentamiento que fluye al interior del tubo del generador.
Condensador	Condensa el vapor mediante una corriente de agua de enfriamiento que fluye por el interior del tubo del condensador.
Bomba del refrigerante	Incrementa la presión del líquido condensado.
Evaporador	Evapora el refrigerante hasta su punto de saturación mediante agua de calentamiento que fluye al interior del tubo del evaporador.
Absorbedor	La película de solución LiBr absorbe vapor. Dicho proceso es exotérmico. Por consiguiente, el calor liberado se recupera a través de una corriente de agua que absorbe el calor. Posteriormente este calor puede integrarse a otro proceso externo que demande una entrada de calor.
Bomba de solución LiBr	Aumenta la presión de la solución LiBr.
Economizador	Promueve el intercambio de calor entre la solución LiBr diluida y concentrada.
Válvula de estrangulamiento	Disminuye la presión de la solución LiBr.

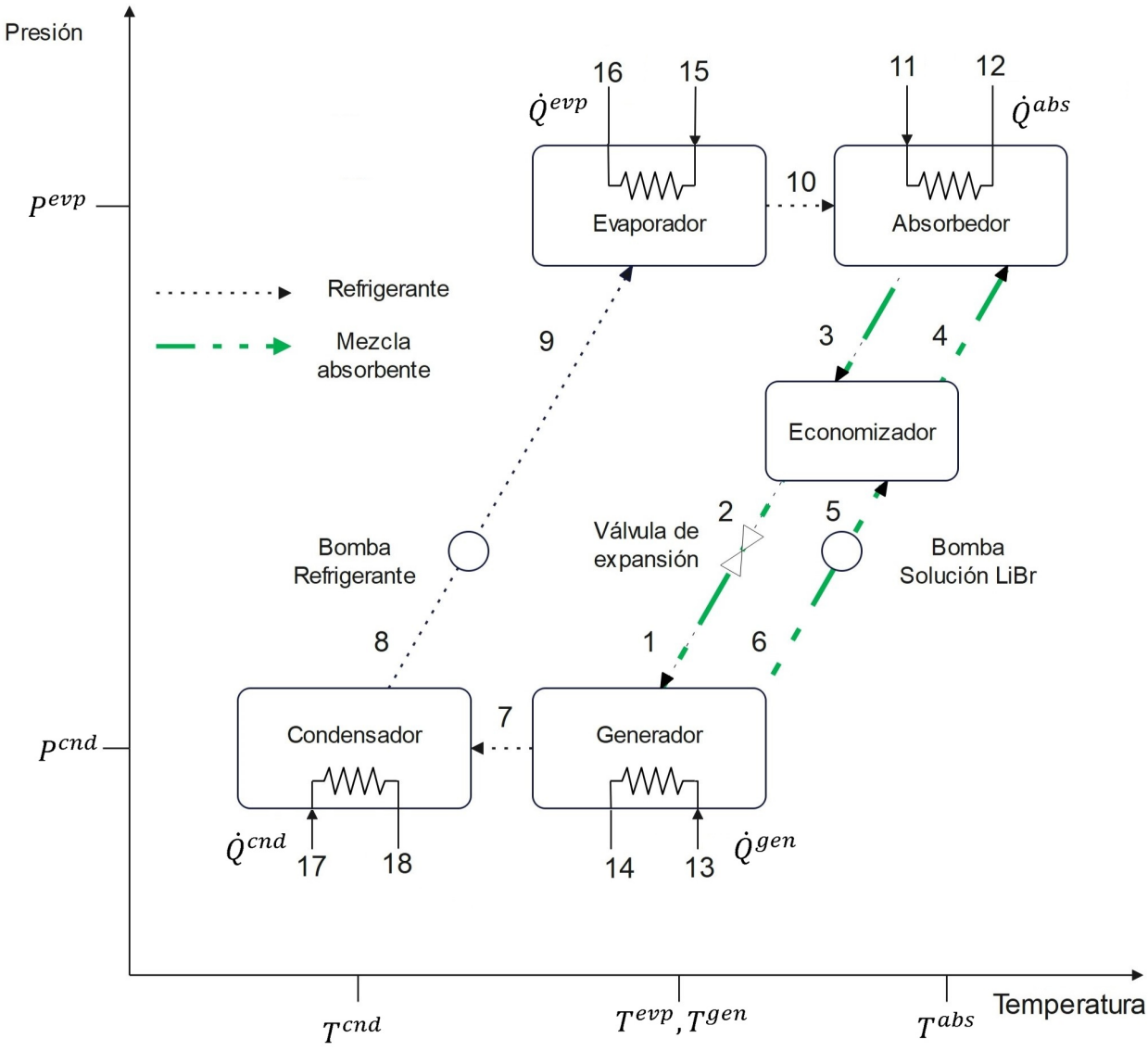


Figura 2: Diagrama esquematico del TTA

Cuatro de las cinco operaciones unitarias principales (generador, condensador, evaporador, absorbedor), son intercambiadores de calor de flujo a contracorriente, cuyas corrientes fluyen:

- Por los *tubos helicoidales* dentro del cual circula agua de calentamiento, enfriamiento o agua a destilar.
- Por *película descendente* que fluye solución acuosa de LiBr por la parte externa del tubo helicoidal.

El economizador consiste en un intercambiador de calor de tubos helicoidales concéntricos. En el tubo interno circula solución diluida de LiBr, mientras que por el tubo externo fluye solución concentrada de LiBr.

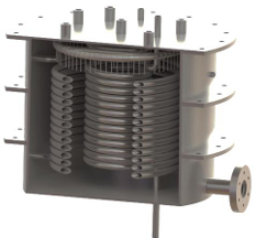
2.3. GEOMETRÍA DEL TTA

Debido a dos procesos de intensificación, se han fusionado en dos corazas dúplex:

- *Evaporación* y *absorción* a alta presión. Este arreglo consiste de dos tubos helicoidales concéntricos. El evaporador se coloca en la parte interna del componente dúplex y el absorbedor en la parte externa. La geometría del equipo *Evaporador - Absorbedor* puede verse en la figura 3a. En la parte superior del componente, hay dos distribuidores circulares que suministran el fluido al evaporador y al absorbedor. En el evaporador, el refrigerante fluye como película descendente por la parte externa del tubo helicoidal, la cual se evapora, mientras que agua que suministra calor circula por el interior del tubo helicoidal. En el absorbedor, la solución LiBr - H_2O fluye como película descendente. Mientras el vapor se absorbe, una reacción exotérmica se lleva a cabo. El agua impura que fluye dentro del tubo helicoidal recupera el calor liberado y se produce agua destilada. No obstante, la destilación de agua impura queda fuera del alcance del modelo.

- *Generación de vapor* y *condensación* a baja presión. Los intercambiadores de calor helicoidales están apilados, siendo el generador colocado en la parte inferior de la coraza. La geometría del *Generador - Condensador* puede visualizarse en la figura 3b. En el generador, la solución LiBr - H_2O pasa a través de un distribuidor por goteo para después fluir como película descendente. Posteriormente, una cierta cantidad de vapor de agua se desprende de la solución. Para conseguir esta desorción, es necesario suministrar calor mediante agua de calentamiento, que fluye al interior del tubo helicoidal. En el condensador, ubicado en la parte superior de la coraza, el vapor de agua se condensa cuando entra en contacto con el tubo helicoidal. Para lograr la condensación, agua de enfriamiento circula en el tubo helicoidal. Finalmente, el condensado se recolecta y se bombea hacia el evaporador.

Por consiguiente, una forma mas adecuada de representar el TTA puede verse en la figura 4. No obstante, no se debe confundir la representación del TTA en la figura 4 de la configuración geométrica del equipo experimental.



(a) Componente dúplex evaporador - absorbedor



(b) Componente dúplex generador - condensador

Figura 3: Intensificación de procesos en el TTA. [Delgado-Gonzaga, 2018]

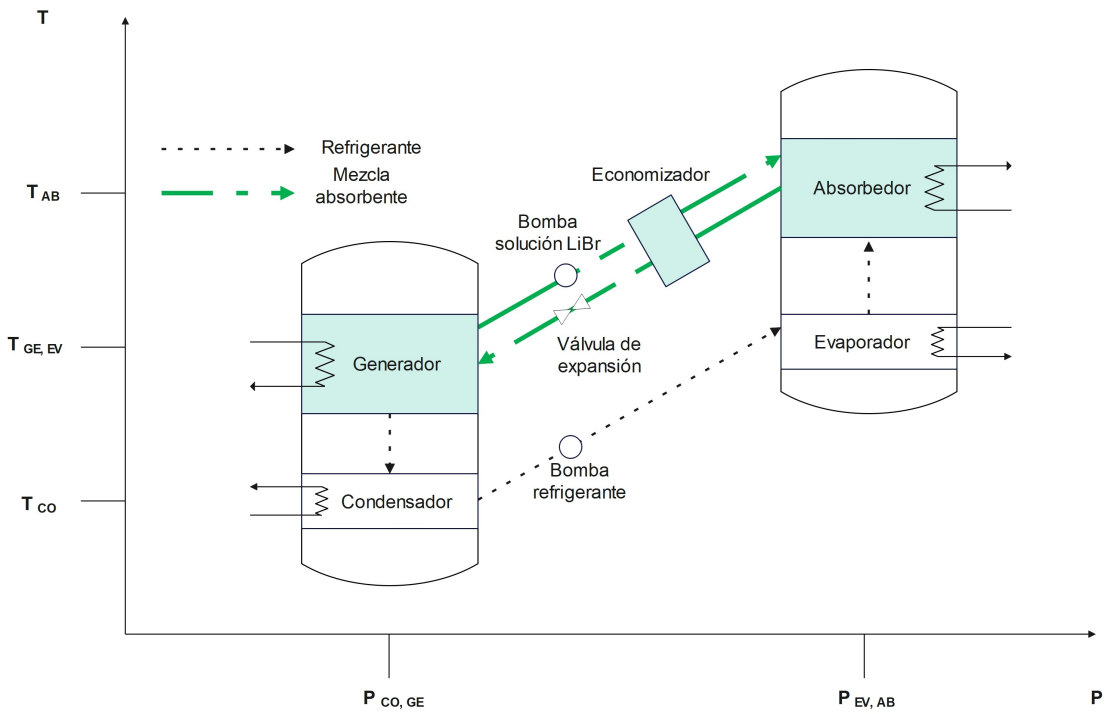


Figura 4: Diagrama *presión - temperatura* del TTA después de *intensificación* de *evaporación - absorción* y *desorbción - condensación*.

Tabla 3: Geometría del componente dúplex Evaporador - Absorbedor. [Delgado-Gonzaga, 2018]

	Evaporador	Absorbedor
Altura del serpentín (m)	0.228	0.208
Longitud del tubo (m)	4.65	10.11
Número de vueltas	13	13
Diámetro externo del serpentín (m)	0.117	0.257
Diámetro interno del tubo (m)	0.0111	0.0111
Diámetro externo del tubo (m)	0.0127	0.0127
Espesor de la pared del tubo (m)	8e-4	8e-4
Separación entre vueltas (m)	3e-3	3e-3
Área de transferencia de calor (m2)	0.18	0.40

Tabla 4: Geometría del componente dúplex generador - condensador [Delgado-Gonzaga, 2018].

Unidad	Generador		Condensador	
Zona	Interna	Externa	Interna	Externa
Altura de serpentín (m)	0.273	0.314	0.168	0.204
Longitud de tubo (m)	5.50	9.27	4.5	5.11
Número de vueltas	15.5	15.5	9.5	11.5
Diámetro externo del serpentín (m)	0.129	0.209	0.163	0.213
Diámetro interno del tubo (m)	8.5e-3	8.5e-3	0.0111	0.0111
Diámetro externo del tubo (m)	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127
Espesor de la pared del tubo (m)	2.1e-3	2.1e-3	8e-4	8e-4
Separación entre vueltas (m)	0.017	5e-3	0.017	5e-3
Área de transferencia de calor (m2)	0.2194	0.3699	0.1795	0.2793

3. MODELO MATEMÁTICO

3.1. PROPIEDADES FÍSICAS

En el presente modelo, se calcularon las propiedades físicas de:

- Solución de LiBr - H_2O. Dichas propiedades se obtuvieron a partir de la correlación propuesta por [Yuan and Herold, 2005] (Ver apéndice C).
- Refrigerante. Los estados termodinámicos del agua que se consideraron son:
  - Líquido subenfriado
  - Líquido saturado
  - Mezcla líquido - vapor
  - Vapor saturado
  - Vapor sobrecalentado

  Estas propiedades se evaluaron a partir de las ecuaciones establecidas para las regiones 1,2 y 4 de la formulación IAPWS-97 [Kretzschmar and Wagner, 2019].
- Corrientes de servicio. (Calentamiento o enfriamiento) Para ambas corrientes, se evalúa el calor específico y la densidad a la temperatura de entrada, mediante la formulación IAPWS-97.

3.2. SUPOSICIONES EN EL MODELO

Con el fin de facilitar el modelado y la resolución del modelo matemático, se hicieron las siguientes suposiciones:

1. Cada operación unitaria (generador, condensador, evaporador y absorbedor) se puede representar mediante [Zhou et al., 2023]:
   - *Coraza*, que contiene una mezcla *líquido - vapor* de agua pura, o bien de solución LiBr acuoso - vapor de agua. Ambas fases se encuentran acopladas por procesos de transferencia de masa y calor.
   - *Pared del intercambiador de calor*, entre la película descendente de agua pura o de la solución LiBr y el agua de calentamiento o enfriamiento.
2. Las ecuaciones de balance consideran variaciones de las variables de estado con respecto al tiempo e incluye flujos de materia y energía [Stephan et al., 1997].
3. La temperatura, presión y composición son homogéneas dentro de los componentes del TTA.
4. La solución LiBr acuosa se encuentra en equilibrio termodinámico con el vapor de agua dentro del generador y absorbedor.
5. El refrigerante abandona el evaporador como vapor saturado y el condensador como líquido subenfriado.

6. Solo el compuesto mas volátil (agua) pasa de la fase líquida a la fase vapor y viceversa.

7. Cada intercambiador de calor tiene un coeficiente global de transferencia de calor constante, evaluado a partir de datos experimentales.

8. No se consideran las pérdidas de calor entre las tuberías y el medio ambiente.

9. No se toma en cuenta el tiempo de retardo para el transporte de fluido entre componentes.

10. Los cambios de presión se deben a los procesos termodinámicos de cada operación unitaria y se aproximan considerando comportamiento de gas ideal [Marc et al., 2015].

11. En el presente modelo solo se considera la transferencia de calor por convección y conducción, debido a que las temperaturas involucradas en los intercambiadores de calor no son lo suficientemente altas para que la transferencia de calor por radiación sea un mecanismo significativo.

12. Se considera una eficiencia de mojado del 100 %, es decir, toda la superfice del tubo helicoidal está cubierta por la película descendente.

La tabla 5 muestra un resumen de las características de modelos reportados en la literatura y del presente modelo.

Tabla 5: Comparación de características de diferentes modelos reportados con el modelo actual

Modelo	[Herold et al., 2016]	[Bian et al., 2005]	[Marc et al., 2015]	[Stephan et al., 1997]	[Zhou et al., 2023]	Presente modelo
Fenómeno	Estanque	Estanque	Película descendente	Estanque	Estanque	Película descendente sobre tubo helicoidal
Fluido	$LiBr/H_2O$	$LiBr/H_2O$	$LiBr/H_2O$	$NaOH/H_2O$	$LiBr/H_2O$	$LiBr/H_2O$
Propiedades físicas	[Yuan and Herold, 2005]	[Yuan and Herold, 2005]	[Pátek and Klomfar, 2006]	[Zaytsev and Aseyev, 1992]	[Kaita, 2001]	[Yuan and Herold, 2005]
Volumen de control	Global	Global	Por fases	Por fases	Global y por zonas	Global y por fases
Geometría	Componentes unitarios	Componentes unitarios	Componentes unitarios	Componentes unitarios con intercambiadores de calor de tubo helicoidal	Componentes unitarios con intercambiadores de calor a contraflujo	Componentes dúplex con intercambiadores de calor de tubo helicoidal
Modo de operación	TTA	Bomba de calor por absorción para enfriamiento	Bomba de calor por absorción para enfriamiento	TTA	TTA	TTA
Dinámica	Estado estable	Estado transitorio	Estado transitorio	Estado estable y transitorio	Estado transitorio	Estado transitorio

3.3. GENERADOR

La finalidad del generador es concentrar la solución absorbente para el absorbedor. Esto se consigue a través de:

1. Circular agua de calentamiento dentro del intercambiador de calor helicoidal, a fin de calentar la solución LiBr - H_2O hasta su punto de saturación.

2. Disminuir la presión de la solución LiBr, por medio de una válvula de expansión

De esta manera, la solución LiBr desprende vapor de agua, como se observa en la figura 5

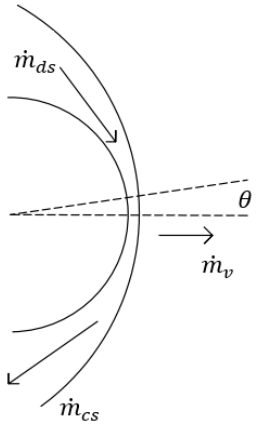


Figura 5: Desorción de vapor en el generador por película descendente.

3.3.1. BALANCES DE MATERÍA Y ENERGÍA

Si se considera solo la película descendente como volumen de control, se establece el balance de materia se define por:

$$\frac{d}{dt}\left(M_{mix}^{gen}\right) = \dot{m}_{ds}^{i} - \dot{m}_{cs}^{o} - \dot{m}_{v,flm}^{o} \tag{3.3.1}$$

Donde M_{mix} es la masa de la mezcla solución LiBr - vapor de agua. Por consiguiente, la ecuación 3.3.1 se puede reescribir como:

$$V_{shell}^{gen}\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{gen}\right) = \dot{m}_{ds}^{i} - \dot{m}_{cs}^{o} - \dot{m}_{v,flm}^{o} \tag{3.3.2}$$

Suponiendo que la solución se mezcla perfectamente, se establece el balance de materia por especie para la película mediante:

$$\frac{d}{dt}\left(x_{cs}^{o}M_{flm}^{gen}\right) = \left(x\dot{m}\right)_{ds}^{i} - \left(x\dot{m}\right)_{cs}^{o} \tag{3.3.3}$$

Donde M_{flm}^{gen} es la masa de la película descendente y puede aproximarse mediante:

$$M_{flm}^{gen} = \rho_{ds}^{i}\delta A_{flm}^{gen} \tag{3.3.4}$$

Donde δ es el espesor de película promedio y se calcula mediante [Bird et al., 2002]:

$$\delta = \frac{1}{\pi}\left(\frac{3\mu_{ds}^{i}\Gamma_{ds}^{i}}{\left(\rho_{ds}^{i}\right)^{2}g}\right)^{1/3}\int_{0}^{\pi}\left(\frac{1}{\sin\theta}\right)^{1/3}d\theta \tag{3.3.5}$$

La integral de la ecuación (3.3.5) se aproxima mediante el método de la *cuadratura Guassiana* [Burden and Faires, 2010]. Evaluando la integral, (3.3.5) se reduce a:

$$\delta = 1.93115 \left(\frac{\mu_{ds}^{i} \Gamma_{ds}^{i}}{\left(\rho_{ds}^{i}\right)^{2} g} \right)^{1/3} \tag{3.3.6}$$

Dónde μ_{ds}^{i} es la viscosidad dinámica de la solución LiBr (Ver apéndice C) y Γ_{ds}^{i} se define mediante:

$$\Gamma_{ds}^{i} = \frac{\dot{m}_{ds}^{i}}{2L_t} \tag{3.3.7}$$

Donde L_t corresponde al perímetro de la primera vuelta del helicoidal. Las propiedades físicas de la ecuación (3.3.6) se evaluan a T_{ds}^{i} y x_{ds}^{i}

Por el otro lado, si solo se considera la fase vapor se establece el balance de materia como:

$$\frac{d}{dt}\left(M_{v}^{gen}\right) = \dot{m}_{v,flm}^{o} - \dot{m}_{v,shell}^{o} \tag{3.3.8}$$

Donde $\dot{m}_{v,shell}^{o}$ se evalúa a partir del principio de Bernoulli.

$$m_{v,shell}^{o} = \pi r^{2} \rho_{v} \left[2000 \frac{\left(P^{gen} - P^{cnd}\right)}{\rho_{v}} \right]^{0.5} \tag{3.3.9}$$

Donde rho_v se aproxima a partir de la formulación IAPWS-IF97:

$$\rho_{v} = \rho(P^{gen}, h_{v}^{o}) \tag{3.3.10}$$

Donde h_{v}^{o} se evalúa a partir de:

$$h_{v}^{o} = h(P^{gen}, T_{v}^{o}) \tag{3.3.11}$$

Si se consideran ambas fases en la coraza del generador, se define el balance de energía mediante:

$$\frac{d}{dt}\left(U_{mix}^{gen}\right) = (\dot{m}h)_{ds}^{i} - (\dot{m}h)_{cs}^{o} - (\dot{m}h)_{v,flm}^{o} + Q_{flm}^{gen} \tag{3.3.12}$$

Tomando en cuenta que $U = H - PV$, el balance de energía en la mezcla líquido (Solución LiBr) - vapor en la cámara del generador puede reescribirse como [Zhou et al., 2023] (Ver apéndice B):

$$V_{shell}^{gen} \frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{gen} h_{mix}^{gen} - P^{gen}\right) = (\dot{m}h)_{ds}^{i} - (\dot{m}h)_{cs}^{o} - (\dot{m}h)_{v}^{o} + \dot{Q}_{flm}^{gen} \tag{3.3.13}$$

Donde ρ_{mix}^{gen} y h_{mix}^{gen} se calculan a partir de (3.3.14) y (3.3.15):

$$\rho_{mix}^{gen} = (1-q)\rho_{cs}^{o} + q\rho_{v}^{o} \tag{3.3.14}$$

$$h_{mix}^{gen} = (1-q)h_{cs}^{o} + qh_{v}^{o} \tag{3.3.15}$$

Donde q es la calidad de vapor dentro de la coraza del generador y se estima mediante:

$$q = \frac{m_{v,flm}^{o}}{m_{v,flm}^{o} + m_{cs}^{o}} \tag{3.3.16}$$

Debido a que la densidad de la solución LiBr es una función de la temperatura y composición, $\rho_{cs}^{o} = \rho(T, x)$, la derivada total o sustancial con respecto al tiempo se expresa como:

$$\frac{d\rho_{cs}^{o}}{dt} = \frac{\partial \rho_{cs}^{o}}{\partial T}\frac{dT_{cs}^{o}}{dt} + \frac{\partial \rho_{cs}^{o}}{\partial x}\frac{dx_{cs}^{o}}{dt} \tag{3.3.17}$$

El balance de energía en el agua de calentamiento se define mediante [Zhou et al., 2023]:

$$\rho_{hw}^{i} V_{tub}^{gen} Cp_{hw}^{i} \frac{d}{dt}\left(T_{hw}^{o}\right) = \dot{m}_{hw} Cp_{hw}^{i}\left(T_{hw}^{i} - T_{hw}^{o}\right) - \dot{Q}_{tub}^{gen} \tag{3.3.18}$$

El cambio de la energía interna de la pared puede aproximarse por la ecuación (3.3.19)

$$M_{wll}^{gen} Cp_{wll}^{gen} \frac{d}{dt}\left(T_{wll}^{gen}\right) = \dot{Q}_{tub}^{gen} - \dot{Q}_{flm}^{gen} \tag{3.3.19}$$

3.3.2. ECUACIóN DE GAS IDEAL

El cambio de presión en el generador se puede aproximar si se considera que el vapor de agua tiene un comportamiento ideal. Esto es:

$$P^{gen} V_{shell}^{gen} = M_v R T \tag{3.3.20}$$

Donde R es la constante particular para el vapor de agua.

$$R = \frac{R_u}{\bar{M}_{H_2O}} = \frac{8.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmolK}}}{18.01528 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0.46152 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \tag{3.3.21}$$

Tomando la derivada temporal de la ecuación (3.3.20) se obtiene:

$$V_{shell}^{gen} \frac{d}{dt}\left(P^{gen}\right) = R\left(M_v \frac{dT}{dt} + T \frac{dM_v}{dt}\right) \tag{3.3.22}$$

3.3.3. ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Paralelamente, el calor transferido hacia la película puede hallarse por medio de:

$$\dot{Q}_{flm}^{gen} = \left(h_{glb} A\right)_{flm}^{gen} \left(\Delta T_m\right)_{flm}^{gen} \tag{3.3.23}$$

$$\left(\Delta T_m\right)_{flm}^{gen} = 0.5\left[\left(T_{wll}^{gen} - T_{ds}^{i}\right) + \left(T_{wll}^{gen} - T_{cs}^{o}\right)\right] \tag{3.3.24}$$

Similar a ecuación (3.3.23), el calor transferido desde el agua de calentamiento puede deteterminarse mediante:

$$\dot{Q}_{tub}^{gen} = \left(h_{glb} A\right)_{tub}^{gen} \left(\Delta T_m\right)_{tub}^{gen} \tag{3.3.25}$$

$$\left(\Delta T_m\right)_{tub}^{gen} = 0.5\left[\left(T_{hw}^{i} - T_{wll}^{gen}\right) + \left(T_{hw}^{o} - T_{wll}^{gen}\right)\right] \tag{3.3.26}$$

3.3.4. EQUILIBRIO TERMODINÁMICO

La composición de la solución LiBr que abandona el generador, x_{cs}^{o} puede estimarse mediante el equilibrio de fases (3.3.27) [Yuan and Herold, 2005].

$$\mu_{H_2O}^{l} = \mu_{H_2O}^{v} \tag{3.3.27}$$

Donde $\mu_{H_2O}^{v}$ representa el potencial químico del vapor generado y se calcula mediante (Ver apéndice C):

$$\mu_{H_2O}^{v}(P^{gen}, T_v^{o}) = h_{H_2O}^{v}(P^{gen}, T_v^{o}) - T s_{H_2O}^{v}(P^{gen}, T_v^{o}) \tag{3.3.28}$$

Mientras que $\mu_{H_2O}^{l}$ representa el potencial químico del agua en la solución LiBr y se calcula a partir de [Yuan and Herold, 2005]:

$$\mu_{H_2O}^{l}(P^{gen}, T_{cs}^{o}, x_{cs}^{o}) = g(P^{gen}, T_{cs}^{o}, x_{cs}^{o}) - x_{cs}^{o}\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_{T_{cs}^{o}, P^{gen}} \tag{3.3.29}$$

Donde g es la función de la energía libre de Gibbs para la solución LiBr (Ver apéndice C). Combinando las ecuaciones (3.3.27), (3.3.28) y (3.3.29) se construye la función f (3.3.30).

$$f = h^v_{H_2O}(P^{gen}, T^o_v) - Ts^v_{H_2O}(P^{gen}, T^o_v) - g(P^{gen}, T^o_{cs}, x^o_{cs}) - x^o_{cs}\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_{T^o_{cs}, P^{gen}} = 0 \tag{3.3.30}$$

Mediante el método iterativo de Newton aproximamos para x^o_{cs} [Burden and Faires, 2010].

$$(x^o_{cs})^{j+1} = (x^o_{cs})^j - \frac{f\left((x^o_{cs})^j\right)}{\frac{\partial}{\partial x} f\left((x^o_{cs})^j\right)} \tag{3.3.31}$$

La iteración se detiene cuando $\epsilon < \tau = 1 \times 10^{-6}$, donde epsilon se define mediante:

$$\epsilon = |\,(x^o_{cs})^{j+1} - (x^o_{cs})^j\,| \tag{3.3.32}$$

3.4. CONDENSADOR

La finalidad del condensador es cambiar de fase el vapor proveniente de la cámara del generador. Para este fin, circula por el interior del tubo helicoidal agua de enfriamiento. Este proceso puede verse en la figura 6.

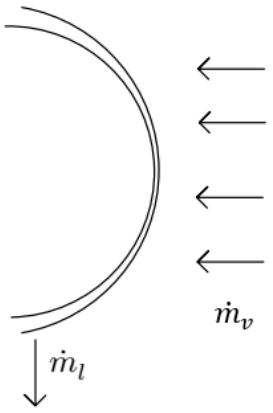


Figura 6: Condensación de refrigerante mediante película descendente

Por lo tanto el balance de materia se establece como:

$$\frac{d}{dt}\left(M_{mix}^{cnd}\right) = \dot{m}_v^i - \dot{m}_l^o \tag{3.4.1}$$

Considerando que el espacio que ocupa la película de la mezcla líquido-vapor se delimita por la coraza del condensador y las paredes del tubo helicoidal, el balance de materia puede reescribirse como (3.4.2):

$$V^{cnd}\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{cnd}\right) = \dot{m}_v^i - \dot{m}_l^o \tag{3.4.2}$$

Mientras que el balance de energía para el lado película se define mediante:

$$\frac{d}{dt}(U_{mix}^{cnd}) = (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_l^o - \dot{Q}_{mix}^{cnd} \tag{3.4.3}$$

Considerando que $U = H - PV$, la ecuación (3.4.3) se reescribe como (Ver apéndice B):

$$V_{shell}^{cnd}\left[\rho_{mix}^{cnd}\frac{d}{dt}\left(h_{mix}^{cnd}\right) + h_{mix}^{cnd}\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{cnd}\right) - \frac{d}{dt}\left(P^{cnd}\right)\right] = (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_l^o - \dot{Q}_{flm}^{cnd} \tag{3.4.4}$$

Donde:

$$h_{mix}^{cond} = (1-q)\,h_l^i + qh_v^o \tag{3.4.5}$$

Siendo q la calidad de vapor, mientras que h_{mix}^{cnd} se relaciona con ρ_{mix}^{cnd} mediante [Kretzschmar and Wagner, 2019]:

$$\rho_{mix}^{cnd} = \rho\left(P_{mix}^{cnd}, h_{mix}^{cnd}\right) \tag{3.4.6}$$

Por lo tanto, la derivada total temporal de ρ_{mix}^{cnd} puede expresarse mediante (3.4.7):

$$\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{cnd}\right) = \frac{\partial\rho}{\partial P}\cdot\frac{d}{dt}\left(P^{cnd}\right) + \frac{\partial\rho}{\partial h}\cdot\frac{d}{dt}\left(h_{mix}^{cnd}\right) \tag{3.4.7}$$

Simultaneamente, el calor transferido por la película del condensador se puede calcular mediante la ecuación constitutiva:

$$\dot{Q}_{flm}^{cnd} = (h_{glb}A)_{flm}^{cnd}\left(\Delta T_m\right)_{flm}^{cnd} \tag{3.4.8}$$

$$(\Delta T_m)^{cnd}_{flm} = 0.5\left[(T^i_v - T^{cnd}_{wll}) + (T^o_l - T^{cnd}_{wll})\right] \tag{3.4.9}$$

Mientras que el cambio de la energía interna de la pared del condensador puede aproximarse por medio de:

$$M^{cnd}_{wll} Cp^{cnd}_{wll} \frac{d}{dt}(T^{cnd}_{wll}) = \dot{Q}^{cnd}_{flm} - \dot{Q}^{cnd}_{tub} \tag{3.4.10}$$

Similar al $\dot{Q}^{cnd}_{flm}$, el flujo de calor transferido por la pared hacia el lado interno del tubo se puede determinar a partir de:

$$\dot{Q}^{cnd}_{tub} = (h_{glb}A)^{cnd}_{tub}\,(\Delta T_m)^{cnd}_{tub} \tag{3.4.11}$$

$$(\Delta T_m)^{cnd}_{tub} = 0.5\left[(T^{cnd}_{wll} - T^i_{cw}) + (T^{cnd}_{wll} - T^o_{cw})\right] \tag{3.4.12}$$

El balance de energía del agua que retira el calor se define como [Zhou et al., 2023]:

$$\rho^i_{cw} V^{cnd}_{tub} Cp^i_{cw} \frac{d}{dt}\,(T^o_{cw}) = \dot{m}_{cw} Cp^i_{cw}(T^i_{cw} - T^o_{cw}) + \dot{Q}^{cnd}_{tub} \tag{3.4.13}$$

3.5. EVAPORADOR

La finalidad del evaporador es evaporar el refrigerante para el absorbedor. Esto se logra suministrando agua de calentamiento en el interior del intercambiador de calor de tubo helicoidal. De esta manera, cuando la película del refrigerante toca el tubo helicoidal, se calienta hasta llegar a su punto de saturación y posteriormente ocurre la evaporación, como se visualiza en la figura 7.

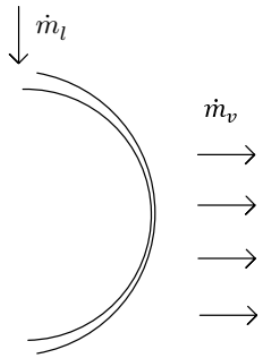


Figura 7: Evaporación de refrigerante

Por consiguiente el balance de materia se establece mediante:

$$\frac{d}{dt}\left(M_{mix}^{evp}\right) = \dot{m}_l^i - \dot{m}_v^o \tag{3.5.1}$$

Suponiendo que el espacio que ocupa la mezcla líquido-vapor se delimita por la coraza del evaporador y las parades del tubo helicoidal, el balance de materia se puede reescribir como (3.5.2)

$$V^{evp}\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{evp}\right) = \dot{m}_l^i - \dot{m}_v^o \tag{3.5.2}$$

Mientras que el balance de energía para lado película se establece como:

$$\frac{d}{dt}\left(U_{mix}^{evp}\right) = (\dot{m}h)_l^i - (\dot{m}h)_v^o + \dot{Q}_{flm}^{evp} \tag{3.5.3}$$

Tomando en cuenta que $U = H - PV$ y suponiendo que la presión en el componente no varía con respecto al tiempo, la ecuación (3.5.3) se reduce a:

$$V^{evp}\left(\rho_{mix}^{evp}\frac{dh_{mix}^{evp}}{dt} + h_{mix}^{evp}\frac{d\rho_{mix}^{evp}}{dt}\right) = (\dot{m}h)_l^i - (\dot{m}h)_v^o + \dot{Q}_{flm}^{evp} \tag{3.5.4}$$

Donde ρ_{mix}^{evp} se relaciona con h_{mix}^{evp} mediante [Kretzschmar and Wagner, 2019]:

$$\rho_{mix}^{evp} = \rho\left(P_{mix}^{evp}, h_{mix}^{evp}\right) \tag{3.5.5}$$

Por consiguiente, la derivada total temporal de la ecuación (3.5.5) es:

$$\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{evp}\right) = \frac{\partial\rho}{\partial P}\cdot\frac{d}{dt}\left(P^{evp}\right) + \frac{\partial\rho}{\partial h}\cdot\frac{d}{dt}\left(h_{mix}^{evp}\right) \tag{3.5.6}$$

Simultáneamente, el calor transferido hacia la película del evaporador se puede calcular mediante la ecuación:

$$\dot{Q}_{flm}^{evp} = \left(h_{glb}A\right)_{flm}^{evp}\left(\Delta T_m\right)_{flm}^{evp} \tag{3.5.7}$$

$$(\Delta T_m)_{flm}^{evp} = 0.5\left[\left(T_{wll}^{evp} - T_l^i\right) + \left(T_{wll}^{evp} - T_v^o\right)\right] \tag{3.5.8}$$

El cambio de la energía interna de la pared del evaporador se puede aproximar mediante:

$$M_{wll}^{evp} Cp_{wll}^{evp} \frac{d}{dt}\left(T_{wll}^{evp}\right) = \dot{Q}_{tub}^{evp} - \dot{Q}_{flm}^{evp} \tag{3.5.9}$$

Donde el flujo de calor transferido desde el tubo hacia la pared del evaporador se calcula por medio de:

$$\dot{Q}_{tub}^{evp} = \left(h_{glb}A\right)_{tub}^{evp} \left(\Delta T_m\right)_{tub}^{evp} \tag{3.5.10}$$

$$(\Delta T_m)_{tub}^{evp} = 0.5\left[\left(T_{hw}^{i} - T_{wll}^{evp}\right) + \left(T_{hw}^{o} - T_{wll}^{evp}\right)\right] \tag{3.5.11}$$

El balance de energía en el agua de calentamiento se define mediante [Zhou et al., 2023]:

$$\rho_{hw}^{i} V_{tub}^{evp} Cp_{hw}^{i} \frac{d}{dt}\left(T_{hw}^{o}\right) = \dot{m}_{hw} Cp_{hw}^{i}\left(T_{hw}^{i} - T_{hw}^{o}\right) - \dot{Q}_{tub}^{evp} \tag{3.5.12}$$

3.6. ABSORBEDOR

El objetivo del absorbedor es diluir la solución absorbente para el generador. Para conseguirlo, la solución LiBr absorbe vapor. Como este proceso es exotérmico, el calor liberado se recupera mediante agua de enfriamiento y puede ser utilizado en otros procesos.

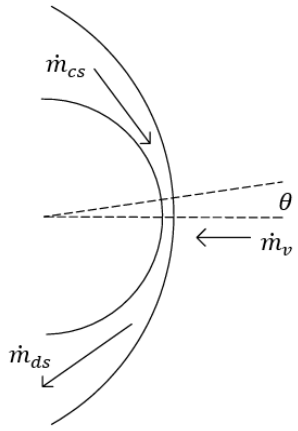


Figura 8: Absorción de vapor en absorbedor

A diferencia del generador, los balances de materia para el absorbedor se plantean considerando dos volúmenes de control:

- Película descendente
- Vapor en la coraza

De esta manera el balance de materia considerando la película descendente se define como:

$$\frac{d}{dt}\left(M_{flm}^{abs}\right) = \dot{m}_{cs}^{i} + \dot{m}_{v}^{i} - \dot{m}_{ds}^{o} \tag{3.6.1}$$

Suponiendo que la solución se mezcla perfectamente dentro del absorbedor, se define el balance de materia por especie mediante:

$$\frac{d}{dt}\left(x_{ds}^{o} M_{flm}^{abs}\right) = (x\dot{m})_{cs}^{i} - (x\dot{m})_{ds}^{o} \tag{3.6.2}$$

Donde M_{flm}^{abs}

$$M_{flm}^{abs} = \rho_{cs}^{i}\delta_{flm}^{abs}A_{flm}^{abs} \tag{3.6.3}$$

Donde δ_{flm}^{abs} es el espesor de película promedio y se calcula mediante (3.3.6). El balance de materia considerando solo la fase vapor se establece como:

$$\frac{d}{dt}\left(m_{v}^{abs}\right) = \dot{m}_{v,shell}^{i} - \dot{m}_{v,shell}^{o} \tag{3.6.4}$$

Donde $\dot{m}_{v,shell}^{o}$ es el vapor que sale de la coraza del absorbedor y es igual al vapor absorbido por la película, de modo que:

$$\dot{m}_{v,shell}^{o} = \dot{m}_{v}^{i} \tag{3.6.5}$$

Dicho vapor puede estimarse a partir de la correlación propuesta por [Kyung et al., 2007]

$$m_v^i = K^{abs}\rho_{ds}^o A_{flm}^{abs}\left(x_{ds}^o - x_{eq}\right) \tag{3.6.6}$$

Donde K^{abs} es el coeficiente de transferencia de masa. Para el presente modelo, se toma el valor reportado por [Jeong and Garimella, 2002].

$$K^{abs} = 7.2 \times 10^{-6} \tag{3.6.7}$$

La composición de LiBr de la solución en equilibio, x_{eq}, puede calcularse a partir del procedimiento establecido por las ecuaciones (3.3.30) y (3.3.31).

El balance de energía considerando solo la película como volumen de control se establece como:

$$\frac{d}{dt}\left(U_{flm}^{abs}\right) = (\dot{m}h)_{cs}^i + (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_{ds}^o - \dot{Q}_{flm}^{abs} \tag{3.6.8}$$

Que puede reescribirse en términos de la entalpía y presión como:

$$\frac{d}{dt}\left(M_{flm}^{abs}h_{flm}^{abs} - P^{abs}V_{flm}^{abs}\right) = (\dot{m}h)_{cs}^i + (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_{ds}^o - \dot{Q}_{flm}^{abs} \tag{3.6.9}$$

Donde V_{flm}^{abs} es el volumen de la película y se aproxima mediante:

$$V_{flm}^{abs} = \delta_{flm}^{abs}A_{flm}^{abs} \tag{3.6.10}$$

Donde el espesor de película δ_{flm}^{abs} se evalúa a las condiciones de entrada, T_{cs}^i y x_{cs}^i empleando la ecuación (3.3.6). Mientras que $\dot{Q}_{flm}^{abs}$ es el calor de absorción, que se calcula mediante [Kyung et al., 2007]:

$$\dot{Q}_{flm}^{abs} = \dot{m}_{cs}^o\left[h_v^i - h_{cs}^i + x_{ds}^o\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)_{T,P}\right] \tag{3.6.11}$$

Aunado a la ecuación de transferencia de calor:

$$\dot{Q}_{flm}^{abs} = (h_{glb}A)_{flm}^{abs}\left(\Delta T_m\right)_{flm}^{abs} \tag{3.6.12}$$

$$\left(\Delta T_m\right)_{flm}^{abs} = 0.5\left[\left(T_{cs}^i - T_{wll}^{abs}\right) + \left(T_{ds}^o - T_{wll}^{abs}\right)\right] \tag{3.6.13}$$

Simultáneamente, el cambio de la energía interna de la pared del absorbedor se puede aproximar mediante la ecuación (3.6.14):

$$M_{wll}^{abs}Cp_{wll}^{abs}\frac{d}{dt}\left(T_{wll}^{abs}\right) = \dot{Q}_{flm}^{abs} - \dot{Q}_{tub}^{abs} \tag{3.6.14}$$

Similar a la ecuación (3.6.12), el calor transferido desde la pared del tubo helicoidal hacia el agua de enfriamiento se puede determinar por medio de (3.6.15):

$$\dot{Q}_{tub}^{abs} = (h_{glb}A)_{tub}^{abs}\left(\Delta T_m\right)_{tub}^{abs} \tag{3.6.15}$$

$$\left(\Delta T_m\right)_{tub}^{abs} = 0.5\left[\left(T_{wll}^{Abs} - T_{cw}^i\right) + \left(T_{wll}^{Abs} - T_{cw}^o\right)\right] \tag{3.6.16}$$

El balance de energía en el fluido de enfriamiento se establece como:

$$V_{tub}^{abs}\rho_{cw}^i Cp_{cw}^i\frac{d}{dt}\left(T_{cw}^o\right) = \dot{m}_{cw}Cp_{cw}^i\left(T_{cw}^i - T_{cw}^o\right) + \dot{Q}_{tub}^{abs} \tag{3.6.17}$$

Los cambios de presión en el absorbedor se pueden aproximar considerando comportamiento de gas ideal como:

$$V_{shell}^{abs}\frac{d}{dt}\left(P^{abs}\right) = R_w\left[m_v^{abs}\frac{d}{dt}\left(T_v^i\right) + T_v^i\frac{d}{dt}\left(m_v^{abs}\right)\right] \tag{3.6.18}$$

3.7. ECONOMIZADOR (INTERCAMBIADOR DE CALOR DE SOLUCIONES DE LiBr)

El economizador es un intercambiador de calor que opera a flujo contracorriente, mediante un arreglo helicoidal de tubos concéntricos. La función del economizador es promover la transferencia de calor desde la solución diluida, que circula por el tubo interno hacia la solución concentrada, que fluye por el tubo exterior.

Dentro de los tubos helicoidales no existe acumulación de masa, por consiguiente los balances de materia se reducen a:

$$\dot{m}_{ds}^{i} = \dot{m}_{ds}^{o} \tag{3.7.1}$$

$$\dot{m}_{cs}^{i} = \dot{m}_{cs}^{o} \tag{3.7.2}$$

El cambio de la energía interna de la solución diluida se define mediante:

$$\frac{d}{dt}\left(mu\right)_{ds} = \dot{m}_{ds}^{i}\left(h_{ds}^{i} - h_{ds}^{o}\right) - \dot{Q}_{ds}^{inn} \tag{3.7.3}$$

Considerando que la presión se mantiene constante dentro del economizador y que la variaciones del volumen específico de la solución LiBr son insignificantes, la ecuación (3.7.3) se puede reescribir como:

$$\frac{d}{dt}\left(mh\right)_{ds} = \dot{m}_{ds}^{i}\left(h_{ds}^{i} - h_{ds}^{o}\right) - \dot{Q}_{ds}^{inn} \tag{3.7.4}$$

Tomando en cuenta que:

$$m_{ds}\frac{dh_{ds}}{dt} = m_{ds}Cp_{ds}\frac{dT_{ds}}{dt} \tag{3.7.5}$$

La ecuación (3.7.4) se convierte en:

$$m_{ds}Cp_{ds}^{o}\frac{dT_{ds}^{o}}{dt} = \dot{m}_{ds}^{i}\left(h_{ds}^{i} - h_{ds}^{o}\right) - \dot{Q}_{ds}^{inn} \tag{3.7.6}$$

Donde m_{ds} representa la masa del volumen de control. No obstante:

$$m_{ds} = \rho_{ds}V_{tub}^{inn} \tag{3.7.7}$$

Por consiguiente, la ecuación (3.7.6) se reescribe como:

$$\rho_{ds}^{o}V_{tub}^{inn}Cp_{ds}^{o}\frac{dT_{ds}^{o}}{dt} = \dot{m}_{ds}^{i}\left(h_{ds}^{i} - h_{ds}^{o}\right) - \dot{Q}_{ds}^{inn} \tag{3.7.8}$$

Similarmente, se establece el balance de energía para la solución concentrada mediante:

$$\rho_{cs}^{o}V_{tub}^{out}Cp_{cs}^{o}\frac{dT_{cs}^{o}}{dt} = \dot{m}_{cs}^{i}\left(h_{cs}^{i} - h_{cs}^{o}\right) + \dot{Q}_{cs}^{out} \tag{3.7.9}$$

Donde:

- $\dot{Q}_{ds}^{inn}$ denota el flujo de calor transferido desde el fluido que circula por el tubo interno hacia la pared del tubo
- $\dot{Q}_{cs}^{out}$ representa la transferencia de calor desde la pared del tubo hacia el fluido que circula por el tubo externo

Los flujos de calor $\dot{Q}_{ds}^{inn}$ y $\dot{Q}_{cs}^{out}$ se pueden calcular mediante las ecuaciones de transferencia de calor:

$$\dot{Q}_{ds}^{inn} = (h_{glb}A)_{ds}^{inn} \left(\Delta T_m\right)_{ds}^{inn} \tag{3.7.10}$$

$$\left(\Delta T_m\right)_{ds}^{inn} = \frac{1}{2}\left[\left(T_{ds}^{i} - T_{wll}^{eco}\right) + \left(T_{ds}^{o} - T_{wll}^{eco}\right)\right] \tag{3.7.11}$$

$$\dot{Q}_{cs}^{out} = (h_{glb}A)_{cs}^{out} \left(\Delta T_m\right)_{cs}^{out} \tag{3.7.12}$$

$$\left(\Delta T_m\right)_{cs}^{out} = \frac{1}{2}\left[\left(T_{wll}^{eco} - T_{cs}^{i}\right) + \left(T_{wll}^{eco} - T_{cs}^{o}\right)\right] \tag{3.7.13}$$

El cambio de la energía interna de la pared del tubo interno del economizador se aproxima mediante:

$$M_{wll}^{eco} Cp_{wll}^{eco} \frac{d}{dt}\left(T_{wll}^{eco}\right) = \dot{Q}_{ds}^{inn} - \dot{Q}_{cs}^{out} \tag{3.7.14}$$

3.8. GENERADOR - CONDENSADOR

Debido a que el generador y condensador se encuentran contenidos en la misma coraza, se propone la siguiente correlación para calcular la presión del componente dúplex a partir de P^{gen} y P^{cnd}.

$$P_{shell}^{gncd} = \frac{P^{gen}V_{shell}^{gen} + P^{cnd}V_{shell}^{cnd}}{V_{shell}^{gen} + V_{shell}^{cnd}} \tag{3.8.1}$$

En el equipo experimental, el medidor de presión se encuentra en la salida del condesador, por lo que se espera que las lecturas sean muy próximas a la presión simulada del condensador.

3.9. EVAPORADOR - ABSORBEDOR

De manera similar al componente dúplex generador - condensador, se establece la siguiente correlación para calcular la presión del componente dúplex evaporador - absorbedor a partir de las presiones P^{evp} y P^{abs} (Ver apéndice E).

$$P_{shell}^{evab} = \frac{P^{evp}V_{shell}^{evp} + P^{abs}V_{shell}^{abs}}{V_{shell}^{evp} + V_{shell}^{abs}} \tag{3.9.1}$$

Nótese que los cambios de presión dP^{evp}/dt y dP^{abs}/dt corresponden a la dinámica de los procesos de evaporación y absorción. Por consiguiente, la presión medida es una ponderación de ambos procesos.

3.10. COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

De manera general, el *coeficiente global de transferencia de calor* h_{glb} se estima mediante [Çengel and Ghajar, 2020]:

$$\left(\frac{1}{h_{glb}A}\right)_{flm}^{comp} = \left(\frac{1}{h_{glb}A}\right)_{tub}^{comp} = \left(\frac{1}{\lambda A}\right)_{flm}^{comp} + \left(\frac{\ln\left(D^{out}/D^{inn}\right)}{2\pi\kappa L}\right)^{comp} + \left(\frac{1}{\lambda A}\right)_{tub}^{comp} \tag{3.10.1}$$

Donde:

- λ_{flm}^{comp} y λ_{tub}^{comp} son los *coeficientes convectivos de transferencia de calor* para lado película y lado tubo, respectivamente. En el presente estudio, se consideran los coeficientes convectivos como parámetros ajustados (ver tabla 6).

- A_{gen}^{flm} y A_{gen}^{tub} son las *áreas de transferencia de calor* para lado película y lado tubo, respectivamente, y se calculan a partir de:

$$A_{flm}^{gen} = \pi D^{out} L \tag{3.10.2}$$

$$A_{flm}^{gen} = \pi D^{inn} L \tag{3.10.3}$$

- D^{inn} y D^{out} son los diámetros interno y externo del tubo helicoidal (ver tablas 4 y 3).

- κ es la conductividad térmica de la pared del tubo.

- L es la longitud del tubo helicoidal (ver tablas 4 y 3).

CONDENSADOR

El coeficiente convectivo de condensación por película (λ_{flm}) se calculó a partir de correlación 3.10.4 [Bird et al., 2002]:

$$Nu = \frac{\lambda_{flm} D^{int}}{\kappa_l} = C \left[\frac{\acute{\mathrm{L}} \rho_l g \left(\rho_l - \rho_v\right) h'_{fg} (D^{int})^3}{\mu_l \kappa_l \left(T_l^o - T_{wll}^{cnd}\right)} \right]^{0.25} \tag{3.10.4}$$

Donde:

- $C = 0.729$ (tubos horizontales)

- ρ_l y ρ_v son las densidades de líquido y vapor saturado, evaluado a la presión del componente.

- h'_{fg} es la entalpía de evaporación corregida y se calcula por medio de (3.10.5):

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.68 C p_l \left(T_l^o - T_{wll}\right) \tag{3.10.5}$$

$$h_{fg} = h_v^{sat} - h_l^o \tag{3.10.6}$$

- μ_l es la viscosidad dinámica del líquido saturado.

- κ_l es la conductividad térmica del líquido saturado.

Las propiedades de líquido y vapor saturado se evaluaron considerando una presión de 10.83 kPa y una temperatura de pared de 45.8° C [Delgado-Gonzaga et al., 2020].

EVAPORADOR

El coeficiente convectivo de evaporación por película descendente se calculó a partir de la ecuación (3.10.7) [Bird et al., 2002]:

$$Nu = \frac{\lambda_{flm} D^{int}}{\kappa_v} = C \left[\frac{\rho_v g \left(\rho_l - \rho_v\right) h'_{fg} (D^{int})^3}{\mu_v \kappa_v \left(T_{wll} - T_v^o\right)} \right]^{0.25} \tag{3.10.7}$$

Donde:

- $C = 0.62$ (tubos horizontales)
- ρ_l y ρ_v son las densidades de líquido y vapor saturado, evaluado a la presión del componente.
- h'_{fg} es la entalpía de evaporación corregida y se evalúa mediante (3.10.8)

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.80 C p_v \left(T_{wll} - T_v^o\right) \tag{3.10.8}$$

$$h_{fg} = h_v^o - h_l^{sat} \tag{3.10.9}$$

- μ_v es la viscosidad dinámica del vapor.
- κ_v es la conductividad térmica del vapor.

Las propiedades de líquido y vapor saturado se evaluaron considerando una presión de 28kPa y una temperatura de pared de 70° C [Canela-Sánchez et al., 2018].

La tabla 6 muestra los coeficientes convectivos que se utilizaron para el cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor. Sólo los coeficientes convectivos de evaporación y condensación se estimaron a partir de las ecuaciones (3.10.4) y (3.10.7), mientras que el resto se obtuvieron de lo reportado por [Delgado-Gonzaga, 2018].

Tabla 6: Coeficientes convectivos de transferencia de calor.

Componente	λ_{tub}	λ_{flm}
Generador	14.01	1.36
Condensador	5.53	20.25
Absorbedor	4.94	4.57
Evaporador	5.53	14.35

ECONOMIZADOR

El coeficiente global de transferencia de calor se aproxima a partir de [Çengel and Ghajar, 2020]:

$$\frac{1}{(h_{glb}A)_{cs}^{out}} = \frac{1}{(h_{glb}A)_{ds}^{inn}} = \frac{1}{(h_{glb}A)} = \frac{1}{(\lambda A)^{out}} + \frac{1}{(\lambda A)^{inn}} \tag{3.10.10}$$

Donde λ es el coeficiente convectivo de transferencia de calor. Por otro lado, el número de *Nusselt* relaciona la transferencia de calor total (por convección y conducción) y la transferencia de calor solo por conducción (3.10.11).

$$Nu = \frac{\lambda L_c}{\kappa} \tag{3.10.11}$$

Donde κ representa la conductividad térmica del fluido y L_c es la *longitud característica*, que se define como [Tosun, 2007]

- $L_c = D^{int}$, para el tubo interno
- $L_c = \left(D^{ext} - D^{int}\right)$, para la región del espacio anular.

En el presente modelo, se estimo Nu mediante la correlación de Dittus-Bolter (3.10.12).

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^{n} \begin{cases} n = 0.4 & \text{para calentamiento} \\ n = 0.3 & \text{para enfriamiento} \end{cases} \tag{3.10.12}$$

Donde Re y Pr son los números de *Reynolds* y *Prandlt* respectivamente y se definen mediante (3.10.13) y (3.10.14)

$$Re = \frac{\rho \mathbf{v} L_c}{\mu} \tag{3.10.13}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\kappa} \tag{3.10.14}$$

Las propiedades físicas se evaluan a las temperaturas de entrada T_{ds}^{i} y T_{cs}^{i} .

4. AMBIENTE DE MODELADO

El ambiente de modelado que se seleccionó es Modelica. Modelica es un lenguaje declarativo de alto nivel para describir comportamiento matemático [Tiller, 2019]. Se aplica comunmente a sistemas de ingeniería y se puede usar fácilmente para describir el comportamiento de diferentes tipos de componentes ingenieriles. Estos componentes se pueden combinar con subsistemas. Su instalación puede realizarse a partir de `https://openmodelica.org/` (Disponible para *Windows*, *Linux* y *Mac*). La exploración en Modelica comienza con entender como se representa un comportamiento básico. Primero, se considera una ecuación diferencial simple:

$$\frac{dx}{dt} = 1 - x \tag{4.0.1}$$

Esta ecuación puede representarse en Modelica como:

```
model PrimerOrden
   Real x;
equation
   der(x) = 1 - x;
end PrimerOrden
```

Mediante la siguiente secuencia de codificación:

1. El código comienza con la palabra reservada model. Después, sigue el nombre del modelo, definido por el usuario. En el ejemplo presente, se define como PrimerOrden.

2. Posteriormente se continua con la declaración de todas las variables involucradas en la ecuación (4.0.1), excepto la variable *tiempo*. Debido a que la variable x es una variable *continua* y se evalúa sobre el conjunto de los *números reales*, se define como Real x. Otros tipos de variables en modelica son Integer, String y Boolean, que corresponden a las variables de tipo *entero*, *cadena* y *Booleano*, respectivamente.

3. Una vez que se han declarado las variables, se incluyen las ecuaciones que describen el comportamiento del modelo. Modelica utiliza el operador der() para representar la derivada de x con respecto al tiempo.

4. Finalmente, se *inicializa* el sistema, a través del constructo initial equation. Si se desea que el valor inicial de x sea 2, se adiciona la sección initial equation como:

   ```
   model PrimerOrden
      Real x;
   initial equation
      x = 2;
   equation
      der(x) = 1 - x;
   end PrimerOrden
   ```

   Si no se declara explícitamente el valor inicial para x, el compilador de Modelica tomará el valor de 0 como valor predeterminado.

5. Con la finalidad de hacer el modelo mas legible, se puede adicionar texto entre comillas, como se muestra.

```
model PrimerOrden "Ecuacion diferencial de primer orden con valor inicial"
   Real x "variable de estado";
initial equation
   x = 2 "Valor utilizado para computar valores iniciales";
equation
   der(x) = 1 - x;
end PrimerOrden
```

Para ver la implementación de este ejemplo, vea el apéndice G

4.1. MODELADO DE UN SISTEMA FÍSICO

Ahora se explorará cómo construir un modelo que describa el comportamiento de un sistema físico. Consideremos la *ley de enfriamiento de Newton* (4.1.1).

$$mc_p \frac{dT}{dt} = hA(T_\infty - T) \tag{4.1.1}$$

El modelado del sistema se codifica en Modelica como se indica:

```
model EnfriamientoNewton "Ejemplo de enfriemiento de un objeto"
  parameter Real Tinf(unit = "K") = 298.15 "Temperatura ambiente";
  parameter Real T0(unit = "K") = 363.15 "Temperatura inicial";
  parameter Real h(unit = "W.m-2.K-1") = 0.7 "Coeficiente convectivo de enfriamiento";
  parameter Real A(unit = "m2") = 1.0 "Area superficial";
  parameter Real m(unit = "kg") = 0.1 "Masa del objeto";
  parameter Real Cp(unit = "J.kg-1.K-1") = 1.2 "Calor especifico";

  Real T(unit = "K") "Temperatura";

initial equation
  T = T0 "Especifica el valor inicial para T";
equation
  m*Cp*der(T) = h*A*(Tinf - T);
end EnfriamientoNewton;
```

En el código la palabra clave parameter indica la variable cuyo valor es conocido o asignado antes de comenzar la simulación. También puede asignarse para variables que no varian con el tiempo o que son constantes, aunque para estas ultimas también se les puede asignar la palabra reservada constant [Association, 2021].

En el ejemplo anterior, vale la pena observar que hay una expresión del lado izquierdo de la ecuación. En modelica no es necesario que cada ecuación se escriba de forma explícita para una variable. También debemos notar que los valores de los parámetros se relacionan con propiedades físicas de los materiales o condiciones ambientales.

Una desventaja del modelo anterior es que se debe especificar las unidades para cada variable. Afortunadamente, Modelica permite definir *"tipos de variable"* (type). Aplicando tipos de variable al ejemplo anterior, se puede reescribir el código como se muestra a continuación.

```
model EnfriamientoNewton
//tipos de variable
type Temperatura = Real(unit="K", min = 0);
```

```
type CoeficienteConvectivo = Real(unit = "W.m-2.K-1", min = 0);
type Area = Real(unit = "m2", min = 0);
type Masa = Real(unit = "kg", min = 0);
type CalorEspecifico = Real(unit = "J.K-1.kg-1");
//Parametros
parameter Temperatura Tinf = 298.15 "Temperatura ambiente";
parameter Temperatura T0 = 363.15 "Temperatura inicial";
parameter CoeficienteConvectivo h = 0.7 "Coeficiente convectivo de enfriamiento";
parameter Area A = 1.0 "Area superficial";
parameter Masa m = 0.1 "Masa del objeto";
parameter CalorEspecifico Cp = 1.2 "Calor especifico";
//Variables
Temperatura T "Temperatura";
initial equation
T = T0 "Especifica temperatura inicial para T";
equation
m*Cp*der(T) = h*A*(Tinf - T) "Ley de enfriamiento de Newton";
end EnfriamientoNewton;
```

La definición type Temperatura = Real(unit="K", min = 0); establece un nuevo tipo de variable, Temperatura que incorpora variable de tipo Real con unidades físicas de Kelvin (K) y un valor mínimo, establecido por el usuario en 0.

4.2. MODELADO DE COMPONENTES DÚPLEX

Siguiendo la lógica de programación de Modelica, se construyeron los modelos de las operaciones unitarias (ver códigos 1, 2, 4, 5 apéndice H):

- Absorbedor
- Evaporador
- Generador
- Condensador

Posteriormente se construyó el modelo del componente dúplex evaporador - absorbedor a partir de las operaciones unitarias lo integran (ver código 3, apéndice H). En el modelo computacional, se codificaron las siguientes variables:

Tabla 7: Variables en modelo computacional

Componentes	DAE	Derivadas temporales	Derivadas parciales	Algebraicas
Evap - Abs	39	14	1	24
Generador	27	5	0	22
Condensador	13	4	0	9

4.2.1. CONNECT

Mediante el constructo connect se transfieren el valor de las variables de una corriente de salida a una corriente de entrada [Mattsson et al., 1998]. Por ejemplo, si se desea transferir el flujo de vapor que abandona el evaporador con el flujo de vapor que ingresa al absorbedor, se puede lograr mediante:

```
connect(Evaporator.mvo, Absorber.mvi);
```

Que matemáticamente se representa como:

$$(\dot{m}_v^o)^{evp} = (\dot{m}_v^i)^{abs} \tag{4.2.1}$$

4.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS

Para cálculo de propiedades físicas de refrigerante, se utiliza la librería Modelica.Media.Water.IF97_ Utilities, basada en la formulación IAPWS-97, mientras que para solución LiBr se codificaron librerías en lenguaje C a partir de la correlación propuesta por [Yuan and Herold, 2005].

4.2.3. FUNCIONES EXTERNAS

Para llamar las librerías codificadas en C, se utilizó el constructo function, como se indica a continuación:

```
function libr_h
input Real xlibr;
input Real Temperature;
input Real Pressure;
output Real Enthalpy;
external "C" annotation(
IncludeDirectory = "modelica://ThermalM/AHP/Resources",
Include = "#include\"libr_h.c\"");
end libr_h;
```

Nótese que mediante la palabra clave external se puede llamar a una función escrita en C [Association, 2021]. A través del comando IncludeDirectory se indica el directorio donde se encuentra ubicado el archivo.c y mediante Include se especifica el nombre del archivo.c .

4.3. MODELADO DE CICLOS DE ABSORBCIÓN

La resolución del modelo computacional del TTA es más difícil por las siguientes razones:

- No siempre los grados de libertad del sistema DAE es igual a la suma de los grados de libertad de cada componente. Por consiguiente, se debe realizar un análisis de grados de libertad del sistema DAE, a fin de evitar un modelo estructuralmente singular [Urquía-Moraleda and Martín-Villalba, 2018].
- Se debe evaluar si la diferenciación del conjunto DAE proporciona restricciones adicionales. En todos los casos, se debe verificar si los valores iniciales satisfacen las restricciones [Pantelides, 1988].

5. RESULTADOS

5.1. GENERADOR - CONDENSADOR

La tabla 8 compara los resultados obtenidos de la simulación con los datos experimentales reportados por [Delgado-Gonzaga et al., 2020]. En este caso se realizó la simulación por componentes separados. La corriente de vapor de salida del generador se utiliza como corriente de entrada del condensador.

Tabla 8: Comparación de resultados numéricos y experimentales para el componente dúplex *generador - condensador*

	Experimental	Este estudio	Error[%]
Coraza			
P[kPa]	10.83	9.90	8.59
Generador			
m^i_{ds}	0.0202	-	-
T^i_{ds}	69.36	-	-
x^i_{ds}	50.8	-	-
x^o_{cs}	53.3	52.35	1.78
$\dot{m}^o$	8.85e-4	6.00e-4	32.2
T^o_v	79.4	61.0	23.2
$\dot{m}_{hw}$	0.1248	-	-
T^i_{hw}	88.0	-	-
T^o_{hw}	83.6	82.8	0.957
Q_{trn}	2.18	2.73	25.2
Condensador			
T^o_l	41.8	45.63	9.16
$\dot{m}_{cw}$	0.1189	-	-
T^i_{cw}	28.5	-	-
T^o_{cw}	32.5	31.42	3.32
Q_{trn}	-	1.45	-

En la figura 9 se puede observar la desorción de vapor en la película del generador cuando la concentración de LiBr es de 50.8 %, la temperatura de entrada del agua de calentamiento es de 88°C y su flujo másico de 0.1248 kg/s. Este fenómeno, está acoplado a fenómenos de transferencia de calor, que llevan una dinámica más lenta (ver figura 10), lo cual produce un sistema dinámico con fenómenos que ocurren a distintas velocidades.

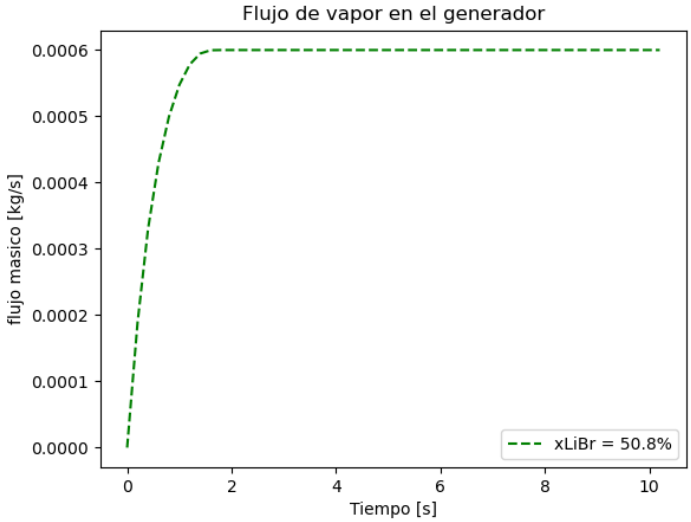


Figura 9: Comportamiento dinámico del vapor desorbido en el *generador*

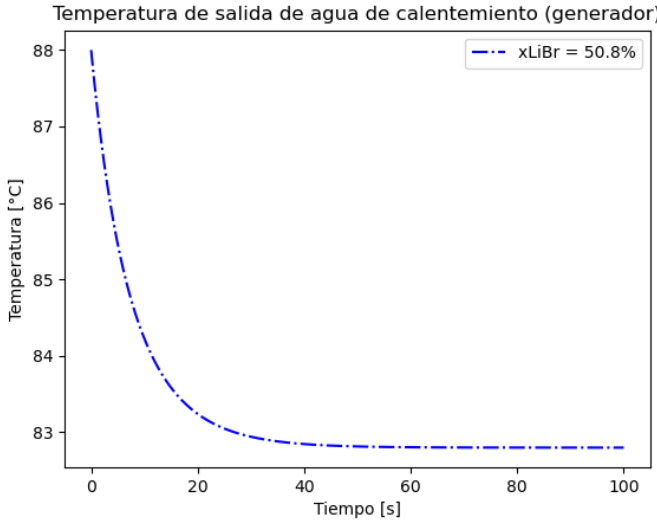


Figura 10: Comportamiento dinámico de la temperatura T^o_{hw}

5.2. EVAPORADOR - ABSORBEDOR

La tabla 9 compara los resultados de la simulación del modelo construido con los obtenidos experimentalmente [Canela-Sánchez et al., 2018] para el componente dúplex Evaporador - Absorbedor. La simulación se detiene cuando $t = 1500\,\text{s}$ (25 min). La presión de operación muestra una discrepancia de 23.94 %. Las temperaturas de película en

Tabla 9: Comparación de resultados numéricos y experimentales para el componente dúplex *evaporador - absorbedor*

	Experimental	Presente estudio	Error[%]
Coraza			
P[kPa]	28.82	21.92	23.94
Evaporador			
$\dot{m}^i$[kg/s]	0.00089	-	-
T_l^i[°C]	35.95	-	-
T_v^o[°C]	68.16	68.56	0.59
$\dot{m}_{hw}$[kg/s]	0.126	-	-
P_{tub}[kPa]	81.86	-	-
T_{hw}^i[K]	76.81	-	-
T_{hw}^o[°C]	74.33	75.37	1.40
$\dot{Q}_{trn}$[kW]	1.31	0.761	41.90
Absorbedor			
$\dot{m}_{cs}^i$[kg/s]	0.01407	-	-
T_{cs}^i[°C]	72.53	-	-
T_{ds}^o[°C]	92.36	88.10	4.61
x_{cs}^i[%]	54.44	-	-
x_{ds}^o[%]	50.18	53.60	6.82
$\dot{m}_{cw}$[kg/s]	0.0520	-	-
P_{tub}[kPa]	81.86	-	-
T_{cw}^i[°C]	94.10	75.0	-
T_{cw}^o[°C]	94.10	80.05	-
$\dot{m}_{dw}$[kg/s]	0.00024	-	-
$\dot{Q}_{trn}$[kW]	-	1.11	-

ambos componentes muestran errores por debajo del 5 %. El calor transferido en el evaporador difiere en un 41.90 %. Esto se debe a que el coeficiente global de transferencia de calor se mantiene constante. Sin embargo, el coeficiente convectivo para ebullición por película depende en gran medida por el gradiente de temperatura entre la película y la pared del tubo. En un modelo mejorado, este coeficiente se recalcularía en cada paso de integración. Otro punto a considerar es la eficiencia de mojado. En el presente modelo, se está considerando que toda la superfice del tubo helicoidal está cubierta por la película descendente. La eficiecia de mojado tendría que evaluarse a partir de las condiciones de operación del equipo.

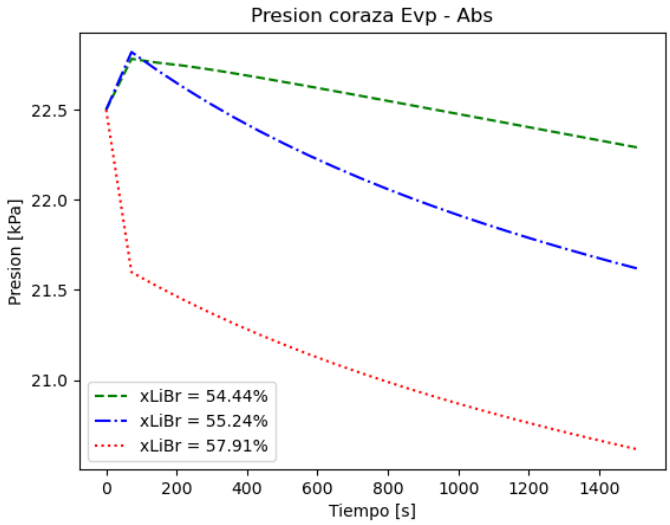


Figura 11: Presión en la cámara del componente dúplex *evaporador - absorbedor*

La figura 11 muestra el comportamiento de la presión en la coraza del *evaporador - absorbedor*. Esta simulación se realizó utilizando los valores reportados en la tabla 9 y con composición LiBr de 54.44 %, 55.24 % y 57.91 %. Se observa que a mayor composición de LiBr, mayor es su capacidad de absorción de vapor, y por ende causa una mayor caída de presión.

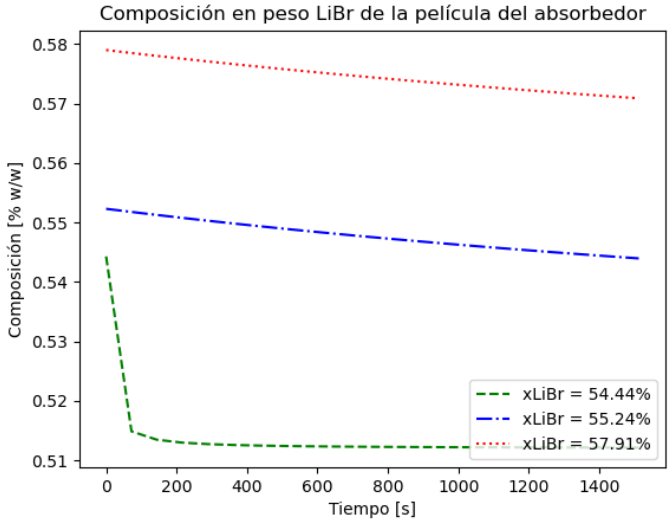


Figura 12: Fracción másica de LiBr en película descendente del *absorbedor*

La figura 12 muestra los perfiles de concentración de LiBr para la película descendente en el absorbedor mientras que la figura 13 muestra el calor transferido en el absorbedor. Nótese que a una composición de 54.44 % se alcanza en menor tiempo el estado estable para composición de LiBr y calor transferido. Esto se debe a la disminución en la viscosidad de la solución LiBr, lo cual favorece la transferencia de calor en la película.

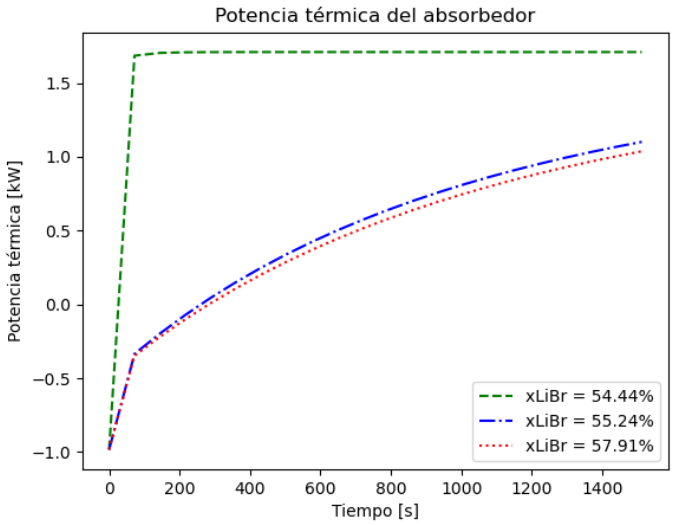


Figura 13: Potencia térmica del *absorbedor*

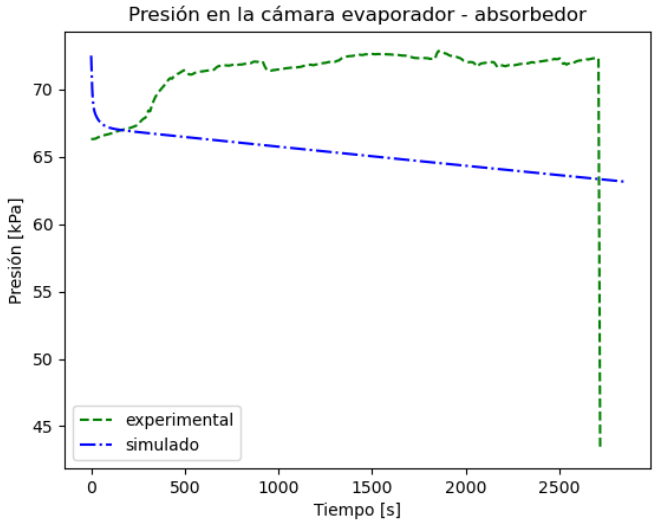


Figura 14: Comparación de la presión experimental y simulada en la cámara evaporador - absorbedor.

La figura 14 muestra los cambios de presión en la cámara del evaporador - absorbedor, cuando el flujo másico del agua de calentamiento del evaporador es de 0.0679 kg/s y la temperatura de 68.0°. El modelo sugiere una reducción paulatina de la presión en la cámara, no obstante, el experimento muestra un ligero aumento. Cabe señalar que después de 2500 s la presión medida desciende abruptamente, posiblemente por pérdida de conexión entre el sensor y el adquisitor de datos. También es necesario mencionar que el modelo del evaporador - absorbedor no se encuentra acoplado al resto de los componentes del TTA.

La figura 15 compara la temperatura de salida del agua destilar experimental y simulada. Nótese que la temperatura experimental fluctúa muy próximo a la temperatura simulada. Es importante considerar que en el modelo no se consideró las fluctuaciones de flujo ni de la temperatura de entrada del agua a destilar.

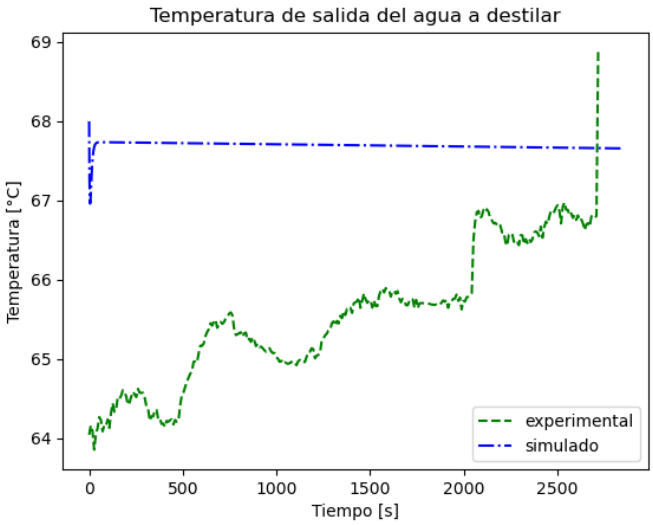


Figura 15: Comparación de la presión experimental y simulada en la cámara evaporador - absorbedor.

6. CONCLUSIONES

Se construyeron modelos matemáticos computacionales del generador, condensador, economizador y evaporador-absorbedor a partir de propiedades físicas, geometría del equipo y condiciones de operación.

El enfoque de simular cada operación unitaria permite validar el modelo con datos experimentales y posteriormente integrarlo a modelos mas complejos.

Un ambiente de modelado adecuado permite avanzar más rápido en modelado de procesos complejos.

Los resultados del modelo mostraron los siquientes errores:

- El error en las temperaturas de las corrientes de servicio es menor al 5 %.
- La composición de LiBr en el generador difiere menos del 2 % entre el valor medido y simulado, mientras que en el absorbedor es menor al 7 %.
- Las presiones medidas y calculadas de los componentes dúplex difieren por abajo del 25 %,

6.1. GENERADOR - CONDENSADOR

La dinámica del componente generador-condensador es más rápida debido al fenómeno de desorción de vapor en la película del generador. Las variables medidas son más sensibles a las condiciones de equilibrio termodinámico, que en el componente evaporador - absorbedor.

6.2. EVAPORADOR - ABSORBEDOR

El fenómeno de difusión de vapor en la película absorbente regula la dinámica de las variables medidas en el componente generador - condensador, lo que produce una dinámica más lenta que en el generador - condensador.

6.3. CICLO TTA

Realizar un análisis de grados de libertad, a fin de evitar un modelo estructuralmente singular y establecer condiciones iniciales consistentes es esencial para la simulación del TTA.

7. RECOMENDACIONES

Experimental

- Monitorear la concentración de LiBr de la solución diluida y concentrada en todo el proceso.
- Colocar un sensor de presión en la cámara del generador. La concentración de LiBr y la presión son variables de estado e inicializan el modelo.
- Medir el flujo de las corrientes de servicio, a fin de monitorear fluctuaciones.
- Revisar conexiones entre instrumentos de medición, transductores y adquisitores de datos, con la finalidad de descartar pérdidas o registros erróneos de datos.

Modelo

- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor de forma dinámica, a partir de lado película y lado tubo.
- Realizar un análisis de sensitividad de modelo.
- Construir el modelo del ciclo TTA de *propiedades físicas ponderadas* a partir de un análisis de grados de libertad y una cuidadosa selección de las variables de estado.
- Diseñar un modelo del TTA *por zonas*. Se propone subdividir los modelos del condensador y evaporador en :

  - Región de cambio de fase
  - Región de calor sensible

  Mientras que el modelo del absorbedor se puede subdividir en:

  - Región de absorción
  - Región de recolección de solución LiBr

- Simular las fluctuaciones de temperatura de entrada de las corrientes de servicio, a fin de probar el modelo bajo pertubaciones.

Referencias

F. Alarcón-Gálvez, J. González-Herrera, R. Guzmán-Sánchez, E. Morales-Manzanares, C. Montiel-Maldonado, and D. Juárez-Romero. Designing components for dynamic process simulation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 3(2):161–175, 2004.

M. Association. Modelica-a unified object-oriented language for systems modeling-version 3.5. *Standard Specification, February*, 2021.

J. Bian, R. Radermacher, and D. Moran. Transient simulation of an absorption chiller in a chp system. In *Proceedings of Int. Sorption Heat Pump Conference*, 2005.

R. Bird, W. Stewart, and E. Lightfoot. *Transport Phenomena*. J. Wiley, 2002. ISBN 9780471364740.

R. L. Burden and J. D. Faires. *Numerical analysis*. Brooks Cole, 2010.

I. Canela-Sánchez, J. Delgado-Gonzaga, A. Huicochea, E. Esche, J.-U. Repke, R. Saravanan, and D. Juarez-Romero. Interaction analysis of a concentric component evaporator absorber for an absorption heat transformer. *Applied Thermal Engineering*, 140:415–421, 2018.

I. J. Canela-Sánchez. *Modelado computacional de un transformador térmico por absorción mediante componentes dúplex*. PhD thesis, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Mor., Mex., 2020. URL `http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/1255`. Doctoral dissertation.

Y. Çengel and A. Ghajar. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill Education, 2020. ISBN 9789813158962.

R. Chang. *Fisicoquímica*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2008. ISBN 9789701066522. URL `https://books.google.com.mx/books?id=DcRVPgAACAAJ`.

J. Delgado-Gonzaga. *Análisis experimental de un transformador térmico por absorción para purificación de agua que opera con componentes duales*. PhD thesis, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Mor., Mex., 2018. Doctoral dissertation.

J. Delgado-Gonzaga, D. Juárez-Romero, R. Saravanan, A. Márquez-Nolasco, A. Huicochea, and L. Morales. Performance analysis of a dual component generator-condenser of an absorption heat transformer for water desalination. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20:100651, 2020.

Fchart. Libr (aqueous lithium bromide) property routines. `https://fchart.com/ees/libr_help/ssclibr.pdf`, 2019.

P. Fritzson, A. Pop, K. Abdelhak, A. Asghar, B. Bachmann, W. Braun, D. Bouskela, R. Braun, L. Buffoni, F. Casella, et al. The openmodelica integrated environment for modeling, simulation, and model-based development. Mic, 2022.

D. Fu, G. Poncia, and Z. Lu. Implementation of an object-oriented dynamic modeling library for absorption refrigeration systems. *Applied thermal engineering*, 26(2-3):217–225, 2006.

S. Gowda, Y. Ma, A. Cheli, M. Gwozdz, V. B. Shah, A. Edelman, and C. Rackauckas. High-performance symbolic-numerics via multiple dispatch. *arXiv preprint arXiv:2105.03949*, 2021.

K. E. Herold, R. Radermacher, and S. A. Klein. *Absorption chillers and heat pumps*. CRC press, 2016.

A. Huicochea and J. Siqueiros. Improved efficiency of energy use of a heat transformer using a water purification system. *Desalination*, 257(1-3):8–15, 2010.

IEA, editor. *World Energy Outlook 2023*. Octuber 2023. URL `https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023`.

S. Jeong and S. Garimella. Falling-film and droplet mode heat and mass transfer in a horizontal tube libr/water absorber. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(7):1445–1458, 2002.

Y. Kaita. Thermodynamic properties of lithium bromide–water solutions at high temperatures. *International Journal of refrigeration*, 24(5):374–390, 2001.

P. Kohlenbach and F. Ziegler. A dynamic simulation model for transient absorption chiller performance. part i: The model. *International journal of refrigeration*, 31(2):217–225, 2008.

G. M. Kontogeorgis, X. Liang, A. Arya, and I. Tsivintzelis. Equations of state in three centuries. are we closer to arriving to a single model for all applications? *Chemical Engineering Science: X*, 7:100060, 2020.

H.-J. Kretzschmar and W. Wagner. *IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam*, pages 7–150. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019. ISBN 978-3-662-53219-5. doi: 10.1007/978-3-662-53219-5_3. URL `https://doi.org/10.1007/978-3-662-53219-5_3`.

E. Kreyszig. *Advanced engineering mathematics 9th edition with Wiley plus set*, volume 334. John Wiley & Sons US, 2007.

I. Kyung, K. E. Herold, and Y. T. Kang. Model for absorption of water vapor into aqueous libr flowing over a horizontal smooth tube. *International journal of refrigeration*, 30(4):591–600, 2007.

O. Marc, F. Sinama, J.-P. Praene, F. Lucas, and J. Castaing-Lasvignottes. Dynamic modeling and experimental validation elements of a 30 kw libr/h2o single effect absorption chiller for solar application. *Applied Thermal Engineering*, 90:980–993, 2015.

S. E. Mattsson, H. Elmqvist, and M. Otter. Physical system modeling with modelica. *Control engineering practice*, 6(4):501–510, 1998.

A. Ochoa, J. Dutra, J. Henríquez, and C. Dos Santos. Dynamic study of a single effect absorption chiller using the pair libr/h2o. *Energy Conversion and Management*, 108:30–42, 2016.

ONU, editor. *Acuerdo de París*. 2015. URL https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement.

C. C. Pantelides. The consistent initialization of differential-algebraic systems. *SIAM Journal on scientific and statistical computing*, 9(2):213–231, 1988.

J. Pátek and J. Klomfar. A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of libr–h2o solutions from 273 to 500 k over full composition range. *International journal of refrigeration*, 29(4):566–578, 2006.

R. H. Perry. *Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill, 8th edition, 2007.

L. R. Petzold. Description of dassl: a differential/algebraic system solver. Sandia National Labs., Livermore, CA (USA), 09 1982. URL https://www.osti.gov/biblio/5882821.

K. Stephan, M. Schmitt, D. Hebecker, and T. Bergmann. Dynamics of a heat transformer working with the mixture naoh-h2o. *International journal of refrigeration*, 20(7):483–495, 1997.

M. Tiller. *Modelica by Example*. Modelica University, 2019. URL https://https://mbe.modelica.university/.

I. Tosun. Evaluation of transfer coefficients: engineering correlations. *Modeling in Transport Phenomena*, pages 59–115, 2007.

UNESCO. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023. Alianzas y cooperación por el agua*. 2023. URL https://www.unesco.org/reports/wwdr/es/reports.

A. Urquía-Moraleda and C. Martín-Villalba. *Modeling and simulation in engineering using Modelica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia (España). Editorial, 2018.

Z. Yuan and K. E. Herold. *Thermodynamic properties of aqueous lithium bromide using a multiproperty free energy correlation*. Number 3. Taylor & Francis, 2005.

I. D. Zaytsev and G. G. Aseyev. *Properties of aqueous solutions of electrolytes*. CRC press, 1992.

Y. Zhou, L. Pan, X. Han, and L. Sun. Dynamic modeling and thermodynamic analysis of lithium bromide absorption refrigeration system using modelica. *Applied Thermal Engineering*, 225:120106, 2023.

C. F. S. P. F. Ziegler, S. Petersen, and C. Fleßner. Simulation of an absorption chiller based on a physical model. In *Proceedings of the 7th Modelica Conference*, pages 20–22, 2009.

A. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

De manera general, para un volumen de control, el balance de materia global puede plantearse mediante la ecuación (A.0.1) [Stephan et al., 1997]:

$$\frac{dM_{vc}}{dt} = \sum_{j=1}^{n}(\dot{m}_j)_{vc}^{i} - \sum_{j=1}^{n}(\dot{m}_j)_{vc}^{o} + G - C \tag{A.0.1}$$

Donde:

- $\frac{dM_{vc}}{dt}$ es el cambio de la materia acumulada en el volumen de control con respecto al tiempo.
- $(\dot{m}_j)_{vc}^{i}$ representa el flujo másico *j*ésimo que entra al volumen de control.
- $(\dot{m}_j)_{vc}^{o}$ representa el flujo másico *j*ésimo que sale del volumen de control.
- G es la velocidad de generación de materia.
- C es la velocidad de consumo de materia.

Para sistemas no reactivos, la ecuación (A.0.1) se reduce a:

$$\frac{dM_{vc}}{dt} = \sum_{j=1}^{n}(\dot{m}_j)_{vc}^{i} - \sum_{j=1}^{n}(\dot{m}_j)_{vc}^{o} \tag{A.0.2}$$

Mientras que el balance de masa por especie se establece mediante:

$$\frac{d(x_k M_{vc})}{dt} = \sum_{j=1}^{n}(x_{j,k}\dot{m}_j)_{vc}^{i} - \sum_{j=1}^{n}(x_{j,k}\dot{m}_j)_{vc}^{o} \tag{A.0.3}$$

Donde:

- $\frac{d(x_k M_{vc})}{dt}$ es el cambio de materia del *k*ésimo componente en el volumen de control con respecto al tiempo.
- $(x_{j,k}\dot{m}_j)_{vc}^{i}$ es la fracción másica del *k*ésimo componente que entra a través de la *j*ésima corriente
- $(x_{j,k}\dot{m}_j)_{vc}^{i}$ es la fracción másica *k*ésimo componente que sale a través de la *j*ésima corriente

Similarmente, el balace de energía se define mediante:

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = \sum_{j=1}^{n}(\dot{m}_j h_j)_{vc}^{i} - \sum_{j=1}^{n}(\dot{m}_j h_j)_{vc}^{o} + \dot{Q} + \dot{W} \tag{A.0.4}$$

Dónde:

- $\frac{dU_{vc}}{dt}$ es el cambio de la energía interna del volumen de control con respecto al tiempo.
- h_j es la entalpía específica asociada al flujo j.
- $\dot{Q}$ es el flujo de calor.
- $\dot{W}$ es la potencia.

B. DESARROLLO DE ECUACIÓN DE ENERGÍA

El cambio de la energía interna de la mezcla líquido - vapor en la cámara del condensador se calcula mediante [Stephan et al., 1997], [Zhou et al., 2023]:

$$\frac{d}{dt}\left(U_{mix}^{cnd}\right) = (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_l^o - \dot{Q}_{mix}^{cnd} \tag{B.0.1}$$

Reescribiendo la ecuación (B.0.1) en términos de la energía interna específica

$$\frac{d}{dt}\left(m_{mix}^{cnd}u_{mix}^{cnd}\right) = (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_l^o - \dot{Q}_{mix}^{cnd} \tag{B.0.2}$$

Dado que la masa de la mezcla líquido-vapor del agua ocupa un volumen delimitado por la carcasa del condensador y el tubo helicoidal, significa que:

$$m_{mix}^{cnd} = \rho_{mix}^{cnd}V^{cnd} \tag{B.0.3}$$

Por consiguiente la ecuación (B.0.2) puede reescribirse como:

$$V^{cnd}\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{cnd}u_{mix}^{cnd}\right) = (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_l^o - \dot{Q}_{mix}^{cnd} \tag{B.0.4}$$

Considerando:

$$u_{mix}^{cnd} = h_{mix}^{cnd} - P^{cnd}v_{mix}^{cnd} \tag{B.0.5}$$

Sustituyendo la ecuación (B.0.5) en (B.0.4) se obtiene:

$$V^{cnd}\frac{d}{dt}\left[\rho_{mix}^{cnd}\left(h_{mix}^{cnd} - P^{cnd}v_{mix}^{cnd}\right)\right] = (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_l^o - \dot{Q}_{mix}^{cnd} \tag{B.0.6}$$

No obstante:

$$\rho_{mix}^{cnd}v_{mix}^{cnd} = 1 \tag{B.0.7}$$

Por lo tanto, la ecuación (B.0.6) se reduce a:

$$V^{cnd}\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{cnd}h_{mix}^{cnd} - P^{cnd}\right) = (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_l^o - \dot{Q}_{mix}^{cnd} \tag{B.0.8}$$

Aplicando las reglas de derivación se obtiene:

$$V^{cnd}\left[\rho_{mix}^{cnd}\frac{d}{dt}\left(h_{mix}^{cnd}\right) + h_{mix}\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{cnd}\right) - \frac{d}{dt}(P^{cnd})\right] = (\dot{m}h)_v^i - (\dot{m}h)_l^o - \dot{Q}_{mix}^{cnd} \tag{B.0.9}$$

Siguiendo el mismo procedimiento, se obtiene el balance de energía para lado película del evaporador:

$$V^{evp}\left[\rho_{mix}^{evp}\frac{d}{dt}\left(h_{mix}^{evp}\right) + h_{mix}^{evp}\frac{d}{dt}\left(\rho_{mix}^{evp}\right) - \frac{d}{dt}(P^{evp})\right] = (\dot{m}h)_l^i - (\dot{m}h)_v^o + \dot{Q}_{mix}^{evp} \tag{B.0.10}$$

C. PROPIEDADES FÍSICAS

Para un sistema abierto, las principales variables termodinámicas se relacionan en la ecuación:

$$U = TS - PV + \sum(\mu_j x_j) \tag{C.0.1}$$

A partir de la ecuación C.0.1 se pueden agrupar términos que forman funciones fundamentales. Las combinaciones más utilizadas se muestran en la tabla 10 [Perry, 2007].

Tabla 10: Funciones termodinámicas

Grupo principal	Literal asignada	Nombre	Agrupamiento alternativo
U	U	Energía Interna	$TS - PV + \sum(\mu_j dx_j)$
$U + PV$	H	Entalpía	$TS + \sum(\mu_j dx_j)$
$U - TS$	A	Energía libre de Helmholtz	$-PV + \sum(\mu_j dx_j)$
$U + PV - TS$	G	Energía libre de Gibbs	$\sum(\mu_j dx_j)$

Yuan and Herold [2005] desarrollaron una correlación para la obtención de propiedades termodinámicas de la solución LiBr, basada en la función fundamental de la energía libre de Gibbs. La correlación proporciona una buena precisión en todo el rango de concentración, desde agua pura hasta la línea de cristalización y desde 5 °C hasta 250 °C.

$$\begin{aligned} g(x,T,P) = {} & (A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^{1.1}) \\ & + T(B_0 + B_1 x + B_2 x^2 + B_3 x^3 + B_4 x^{1.1}) \\ & + T^2(C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^{1.1}) \\ & + T^3(D_0 + D_1 x + D_2 x^2 + D_4 x^{1.1}) \\ & + T^4(E_0 + E_1 x) + \frac{F_0 + F_1 x}{T - T_0} \\ & + P(V_0 + V_1 x + V_2 x^2 + V_3 T + V_4 x T + V_5 x^2 T + V_6 T^2 + V_7 x T^2) \\ & + \ln(T)(L_0 + L_1 x + L_2 x^2 + L_3 x^3 + L_4 x^{1.1}) \\ & + T\ln(T)(M_0 + M_1 x + M_2 x^2 + M_3 x^3 + M_4 x^{1.1}) \end{aligned} \tag{C.0.2}$$

La entalpía del LiBr acuoso es un de las propiedades más usadas en el presente estudio y puede obtenerse a partir de la energía libre de Gibbs mediante:

$$h(x,T,P) = g + Ts = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right) \tag{C.0.3}$$

Derivando la función g (C.0.2) con respecto a la temperatura y sustituyendo en (C.0.3) se obtiene:

$$\begin{aligned} h(x,T,P) = {} & (A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^{1.1}) \\ & - T^2(C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^{1.1}) \\ & - 2T^3(D_0 + D_1 x + D_2 x^2 + D_4 x^{1.1}) \\ & - 3T^4\,(E_0 + E_1 x) + (F_0 + F_1 x)\left(\frac{1}{T - T_0} + \frac{T}{(T - T_0)^2}\right) \\ & + P(V_0 + V_1 x + V_2 x^2 - V_6 T^2 - V_7 x T^2) \\ & + (\ln(T) - 1)\left(L_0 + L_1 x + L_2 x^2 + L_3 x^3 + L_4 x^{1.1}\right) \\ & - T\left(M_0 + M_1 x + M_2 x^2 + M_3 x^3 + M_4 x^{1.1}\right) \end{aligned} \tag{C.0.4}$$

El potencial químico del agua en la solución μ_{H_2O} se obtiene mediante:

$$\mu_{H_2O}\,(x,T,P) = g - x\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right) \tag{C.0.5}$$

Derivando la función g (C.0.2) con respecto a la fracción másica y sustituyendo en (C.0.5) se obtiene:

$$\begin{aligned} \mu_{H_2O}\,(x,T,P) = {} & \left(A_0 - A_2 x^2 - 2A_3 x^3 - 0.1A_4 x^{1.1}\right) \\ & + T\left(B_0 - B_2 x^2 - 2B_3 x^3 - 0.1B_4 x^{1.1}\right) \\ & + T^2\left(C_0 - C_2 x^2 - 2C_3 x^3 - 0.1C_4 x^{1.1}\right) \\ & + T^3\left(D_0 - D_2 x^2 - 0.1D_4 x^{1.1}\right) \\ & + T^4\,(E_0) + \frac{F_0}{T - T_0} \\ & + P\left(V_0 - V_2 x^2 + V_3 T - V_5 x^2 T + V_6 T^2\right) \\ & + \ln(T)\left(L_0 - L_2 x^2 - 2L_3 x^3 - 0.1L_4 x^{1.1}\right) \\ & T\ln(T)\left(M_0 - M_2 x^2 - 2M_3 x^3 - 0.1M_4 x^{1.1}\right) \end{aligned} \tag{C.0.6}$$

La tabla 11 muestra los coeficientes para las ecuaciones (C.0.2), (C.0.4) y (C.0.6).

Tabla 11: Coeficientes para la correlación de propiedades de LiBr acuoso [Yuan and Herold, 2005]

j	0	1	2	3	4
A_j	5.5062×10^{3}	5.2132×10^{2}	7.7749	-4.5752×10^{-2}	-5.7929×10^{2}
B_j	1.45274×10^{2}	-4.9848×10^{-1}	8.8369×10^{-2}	-4.8709×10^{-4}	-2.9051
C_j	2.6483×10^{-2}	-2.3110×10^{-3}	7.5597×10^{-6}	-3.7639×10^{-4}	1.1762×10^{-3}
D_j	-8.5265×10^{-6}	1.3201×10^{-6}	2.7919×10^{-11}	NA	-8.5115×10^{-7}
E_j	-3.8440×10^{-11}	2.6254×10^{-11}	NA	NA	NA
F_j	-5.1599×10^{1}	1.1145	NA	NA	NA
L_j	-2.1834×10^{3}	-1.2669×10^{2}	-2.3645	1.3894×10^{-2}	1.5834×10^{2}
M_j	-2.2670×10^{1}	2.9837×10^{-1}	-1.2593×10^{-2}	6.8496×10^{-5}	2.7679×10^{-1}
V_j	1.1767×10^{-3}	-1.0025×10^{-5}	-1.6957×10^{-8}	-1.4971×10^{-6}	2.5381×10^{-8}
j	5	6	7		
V_j	5.8158×10^{-11}	3.0579×10^{-9}	-5.1295×10^{-11}		

Para el cálculo de la viscosidad dinámica, se empleo la siguiente correlación [Fchart, 2019]:

$$\ln \mu = A_0 + A_1 x^2 + \frac{B_0}{T} + \frac{B_1 x^2}{T} + \frac{C_0}{T} + \frac{C_1 x^2}{T} \tag{C.0.7}$$

Donde μ es la viscosidad dinámica en cP, T es la temperatura en K y x es la fracción másica del LiBr. Las constantes se muestran en la tabla 12

Tabla 12: Constantes para la correlación de viscosidad dinámica (C.0.7)

j	0	1
A_j	-2.32126	3.19059
B_j	-609.45	963.16
C_j	372994.8	-35212.0

D. OBTENCIÓN DE DERIVADAS MEDIANTE Symbolics.jl

A través de la reglas de derivación (regla de la cadena, derivación de funciones trascendentes, etc.), se puede obtener la derivada de cualquier función diferenciable y continua con respecto a una variable. No obstante, este procedimiento puede consumir más tiempo y no obtener la función derivada correcta cuando se trabaja con varias funciones que dependen de varias variables. Por consiguiente, en el presente modelo se empleó la librería *Symbolics.jl* [Gowda et al., 2021] del lenguaje de programación orientado a objetos *Julia*. Por ejemplo, se tiene la función:

$$z = t + t^2 \tag{D.0.1}$$

En el REPL de Julia se define el operador $\frac{d}{dt}$ mediante el comando Differential:

```
using Symbolics
@variables t
ddt = Differential(t)
```

Se define z

```
z = t + t^2
```

Finalmente, se obtiene la derivada mediante:

```
dzdt = ddt(z)
dzdt = expand_derivatives(dzdt)
```

E. PRESIÓN EN UN COMPONENTE DÚPLEX

Considere dos volumenes V_a y V_b conectados mediante una llave de paso. El número de moles de los gases en los volúmenes son n_a y n_b e inicialmente los gases se encuentran a la presión P_a y P_b y misma temperatura T, como se muestra en la figura 16 [Chang, 2008].

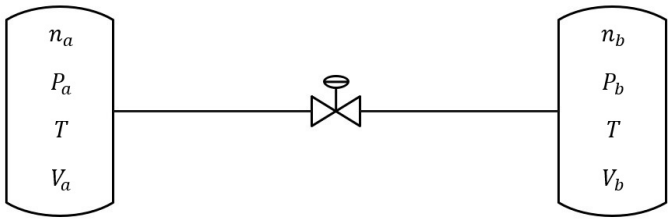


Figura 16: Sistema de volúmenes A y B

Teniendo en cuenta comportamiento ideal, la presión final del sistema se puede calcular mediante:

$$P_{sys} = \left(\frac{n_{sys}}{V_{sys}}\right) RT \tag{E.0.1}$$

Donde:

$$n_{sys} = n_a + n_b \tag{E.0.2}$$

$$V_{sys} = V_a + V_b \tag{E.0.3}$$

El número de moles n_a y n_b se obtiene mediante:

$$n_a = \frac{1}{RT}\left(P_a V_a\right) \tag{E.0.4}$$

$$n_b = \frac{1}{RT}\left(P_b V_b\right) \tag{E.0.5}$$

Combinando ecuaciones (E.0.1 - E.0.5) se obtiene:

$$P_{sys} = \frac{P_a V_a + P_b V_b}{V_a + V_b} \tag{E.0.6}$$

Si consideramos para el componente dúplex:

$$V_{shell}^{evp} = \frac{1}{2} V_{shell} \tag{E.0.7}$$

$$V_{shell}^{abs} = \frac{1}{2} V_{shell} \tag{E.0.8}$$

Sustituyendo en la ecuación E.0.6 se obtiene:

$$P_{shell} = \frac{1}{2}\left(P^{evp} + P^{abs}\right) \tag{E.0.9}$$

F. MÉTODOS NUMÉRICOS

F.1. ECUACIONES NO LINEALES

El método de Newton es un método iterativo para aproximar la solución de ecuaciones no lineales de la forma $f(x) = 0$, donde f es una función continua y diferenciable [Burden and Faires, 2010].

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{\frac{d}{dx} f(x_n)} \tag{F.1.1}$$

Algoritmo para utilizar el método de Newton

1. *Valor inicial.* Comienza con una aproximación inicial x_0 (Idealmente cercano a la raíz).
2. *Iteración.* Computa aproximaciones sucesivas utilizando F.1.1.
3. *Criterio de paro.* La iteración se detiene cuando $|x_{n+1} - x_n| < \tau$, donde τ es una pequeña tolerancia.

Condiciones de convergencia El método converge cuadráticamente si:

- f es dos veces diferenciable cerca de la raíz.
- El valor inicial x_0 es suficientemente cercano a la raíz. Si el valor inicial no es lo suficientemente cercano, el método puede diverger.
- La derivada de la función $df/dx \neq 0$ en la raíz.

El método de Newton puede adaptarse para la resolución de sistema de ecuaciones no lineales (F.1.2):

$$\boldsymbol{x}^{n+1} = \boldsymbol{x}^n - J(\boldsymbol{x}^n)^{-1} \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}^n) \tag{F.1.2}$$

Donde J es la matriz jacobiana (F.1.3)

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(\boldsymbol{x}) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(\boldsymbol{x}) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(\boldsymbol{x}) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(\boldsymbol{x}) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(\boldsymbol{x}) & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}(\boldsymbol{x}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(\boldsymbol{x}) & \frac{\partial f_n}{\partial x_2}(\boldsymbol{x}) & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(\boldsymbol{x}) \end{bmatrix} \tag{F.1.3}$$

F.2. ECUACIONES DIFERENCIALES ORDINARIAS (ODE)

Considere la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dy}{dt} = -ky \tag{F.2.1}$$

Donde $k > 0$ y la condición inicial es $y(t_0) = y_0$

MÉTODO EXPLÍCITO DE EULER

Discretizando la derivada se obtiene [Kreyszig, 2007]

$$\frac{y^{i+1} - y^i}{\Delta t} = -ky^i \tag{F.2.2}$$

Donde Δt es el paso de integración. Despejando y^{i+1} se obtiene:

$$y^{i+1} = y^i - k\Delta t y^i \tag{F.2.3}$$

MÉTODO IMPLÍCITO DE EULER

Nuevamente discretizando la derivada se obtiene [Kreyszig, 2007]:

$$\frac{y^{i+1} - y^i}{\Delta t} = -ky^{i+1} \tag{F.2.4}$$

Reacomodando se obtiene la función implícita:

$$y^{i+1} = y^i - k\Delta t y^{i+1} \tag{F.2.5}$$

Lo cual conlleva a una solución del tipo:

$$y^{i,j+1} = f(y^{i,j}) \tag{F.2.6}$$

La iteración se detiene cuando:

$$\left|y^{i,j+1} - f\left(y^{i,j}\right)\right| \leq \tau \tag{F.2.7}$$

Donde τ es la tolerancia definida por el usuario. Nótese que el método implícito requiere dos ciclos anidados, para el tiempo y la iteración de la ecuación implícita.

MÉTODO DE RUNGE-KUTTA

Cuarto orden Considere la siguiente ecuación diferencial ordinaria [Burden and Faires, 2010]:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \tag{F.2.8}$$

Con la condición inicial $y(t_0) = y_0$ Para $i = 0, 1, 2, \cdots, N-1$

$$k_1 = \Delta t f(t^i, y^i) \tag{F.2.9}$$

$$k_2 = \Delta t f(t^i + \frac{1}{2}\Delta t, y^i + \frac{1}{2}k_1) \tag{F.2.10}$$

$$k_3 = \Delta t f(t^i + \frac{1}{2}\Delta t, y^i + \frac{1}{2}k_2) \tag{F.2.11}$$

$$k_4 = \Delta t f(t^i + \Delta t, y^i + k_3) \tag{F.2.12}$$

$$t^{i+1} = t^i + \Delta t \tag{F.2.13}$$

$$y^{i+1} = y^i + \frac{1}{6}\left(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4\right) \tag{F.2.14}$$

F.3. MÉTODOS PARA SISTEMAS DE ECUACIONES DIFERENCIALES ORDINARIAS

Los problemas de valor inicial para sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden son de la forma:

$$\frac{\boldsymbol{dy}}{\boldsymbol{dt}} = \boldsymbol{f}\left(t, \boldsymbol{y}\right) \qquad\qquad \boldsymbol{y}\left(t_0\right) = \boldsymbol{y_0} \tag{F.3.1}$$

O en forma no vectorial:

$$\begin{aligned}
\frac{dy_1}{dt} &= f_1\left(t, y_1, \cdots y_m\right) & y_1\left(t_0\right) &= y_{10} \\
\frac{dy_2}{dt} &= f_2\left(t, y_1, \cdots y_m\right) & y_2\left(t_0\right) &= y_{20} \\
&\vdots & & \\
\frac{dy_m}{dt} &= f_m\left(t, y_1, \cdots y_m\right) & y_m\left(t_0\right) &= y_{m0}
\end{aligned}$$

Los métodos para ecuaciones ordinarias diferenciales de primer orden se pueden extender a sistemas (F.3.1) simplemente escribiendo funciones vectoriales $\mathbf{y}$ y $\mathbf{f}$ en lugar de funciones escalares y y f, mientras que el tiempo sigue siendo una variable escalar [Kreyszig, 2007].

F.4. MÉTODOS PARA SISTEMAS DE ECUACIONES ALGEBRAICO - DIFERENCIAL (DAE)

DASSL (*Differential-Algebraic System Solver*) Un sistema DAE es una combinación de ecuaciones diferenciales y algebraicas, generalmente descrito como [Petzold, 1982]

$$\boldsymbol{F}\left(t, \boldsymbol{y}, \frac{d\boldsymbol{y}}{dt}\right) = 0 \tag{F.4.1}$$

A diferencia de los sistemas ODE, donde $\frac{d\boldsymbol{y}}{dt}$ es explícito, los sistemas DAE pueden tener restricciones que los hacen más difíciles de resolver.

Características de DASSL

- **Diferenciación hacia atrás**(BDF). DASSL usa métodos BDF, que son esquemas implícitos de paso múltiple, adecuado para problemas rígidos.
- **Tamaño de paso y orden variable**. Ajusta el tamaño de paso y el orden (de 1 a 5) para eficiencia.
- **DAE de Índice 1**. Funciona mejor para DAE de índice 1 (donde las restricciones se pueden resolver explícitamente para variables algebraicas).
- **Iteración**. Resuelve sistemas no lineales usando un método de Newton-Raphson modificado.

Formulación matemática DASSL aproxima la derivada $\frac{dy}{dt}$ usando BDF de k-ésimo orden [Petzold, 1982]:

$$\left(\frac{d\boldsymbol{y}}{dt}\right)^{n+1} \approx \frac{y_{n+1}^m - y_n}{\Delta t_n} = \frac{1}{\Delta t_n} \sum_{i=0}^{k} \alpha_i \boldsymbol{y}_{n+1-i} \tag{F.4.2}$$

Donde:

- Δt es el tamaño de paso actual
- α_i son los coeficientes de BDF

- k es el orden (1-5)

Sustituyendo (F.4.2) en (F.4.1)

$$\boldsymbol{F}\left(t, \boldsymbol{y}, \frac{1}{\Delta t_n}\sum_{i=0}^{k}\alpha_i \boldsymbol{y}_{n+1-i}\right) = 0 \tag{F.4.3}$$

Este sistema no lineal se resuelve usando el método de Newton-Raphson [Petzold, 1982]:

$$y_n^{m+1} = y_n^m - \left(\frac{\partial F}{\partial y'} + \frac{1}{\Delta t_n}\frac{\partial F}{\partial y}\right)^{-1} F\left(t_n, y_n^m, \frac{y_n^m - y_{n-1}}{\Delta t_n}\right) \tag{F.4.4}$$

G. AMBIENTE DE MODELADO *OpenModelica Connection Editor*

Después de abrir *OMEdit*, damos click en nueva clase de Modelica *(New Modelica Class)*, como se muestra en la figura 17.

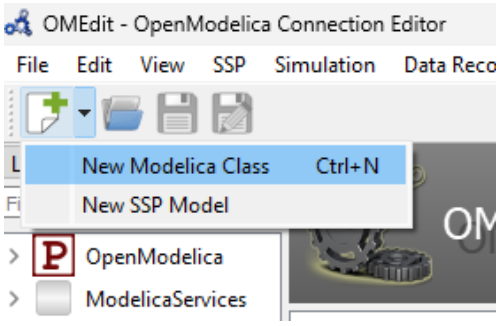


Figura 17: Creación de un nuevo modelo en *Modelica*

Se abrirá una nueva ventana, como se muestra en la figura 18. Se nombra el modelo en el campo *Name*.

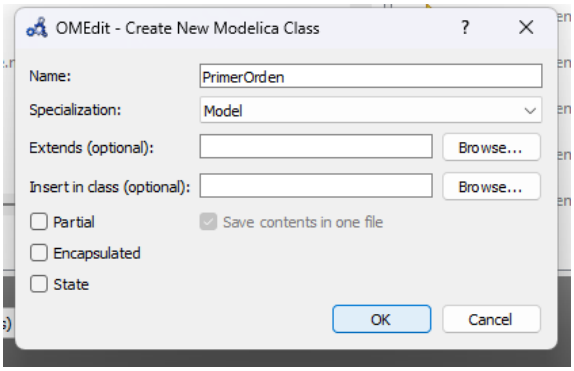


Figura 18: Asignación de nombre al modelo

Se da click en *ok*. Posteriormente cambiamos de vista de diagrama *(Diagram view)* a vista de texto *(Text view)*, como se indica en la figura 19. Posteriormente, se escribe el modelo, de acuerdo a lo descrito en el capítulo 4, como

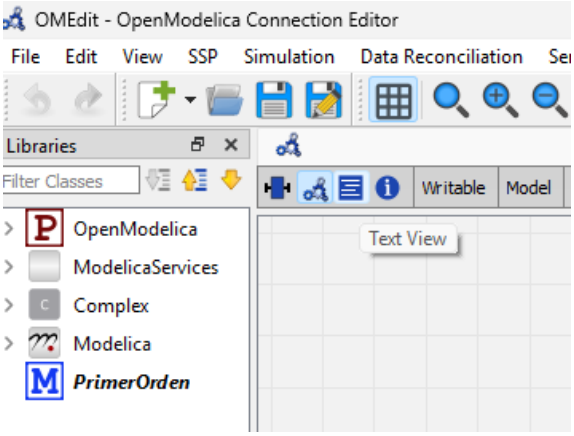


Figura 19: Vista de diagrama en *Modelica*

se muestra en la figura 20. Se guarda el modelo mediante la opción *save as*, como se indica en la figura 21, en la

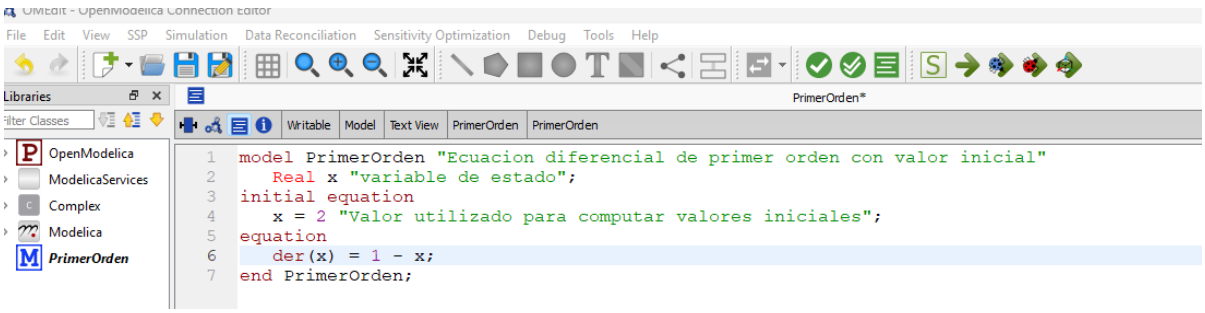


Figura 20: Modelado en OMEdit - OpenModelica Connection Editor

ubicación de preferencia del usuario. A continuación, se verifica que no existan errores de sintaxis o de escritura en

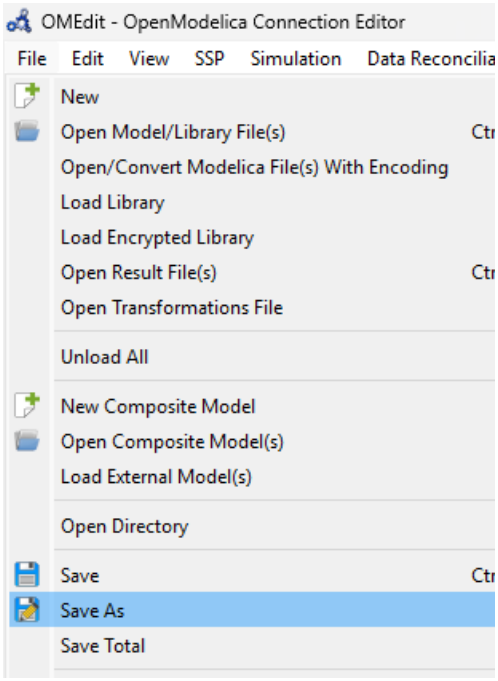


Figura 21: Ejemplo de cómo guardar el modelo en Modelica.

el código. Para ello, damos click en el ícono *Check Model* (símbolo de una palomita o *checkmark*), como se indica en la figura 22. Si la verificación es exitosa, aparecerá un mensaje en la sección *messages*, como se muestra en la



Figura 22: Verificación del modelo.

figura 23. En este punto, ya se puede llevar a cabo la simulación del modelo. Mediante el ícono *Simulate* se ajusta el tiempo de simulación, el número de subintervalos a gráficar, el método numérico de resolución y la tolerancia. El método predeterminado por Modelica es *DASSL*. Finalmente, se pueden visualizar los resultados de la simulación

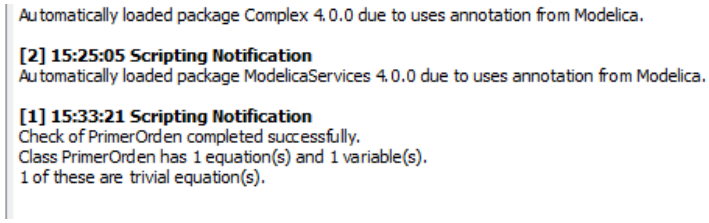


Figura 23: Verificación exitosa del modelo en Modelica

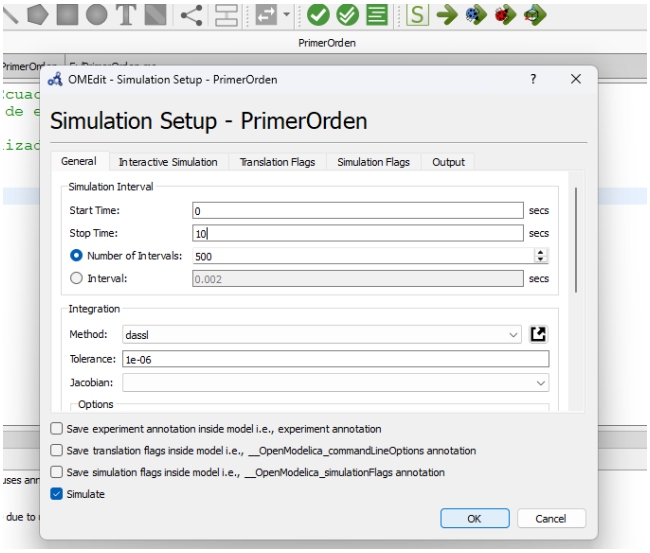


Figura 24: Configuracion de simulación en Modelica

seleccionando la variable de interés en la sección *Variables*, como se muestra en la figura 25.

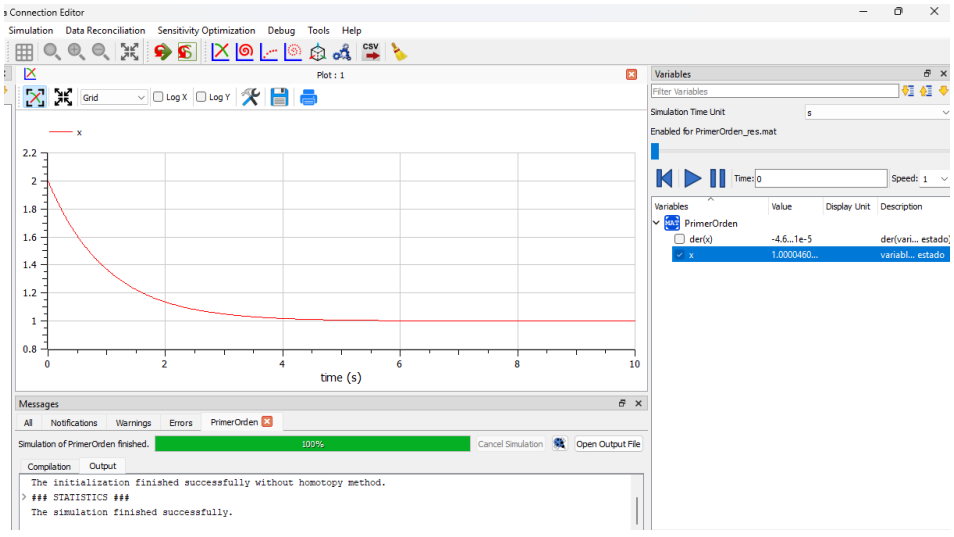


Figura 25: Resultados de la simulación para $t = [0, 10]$ segundos

H. CÓDIGOS FUENTES

Código 1: Modelado del Absorbedor

```
model AbsMode
connector InletFlow = input Real(unit = "kg/s", min = 0.0);
connector InletTemp = input Real(unit = "K", min = 273.16);
connector InletComp = input Real(unit = "kg/kg", min = 0.0, max = 0.70);
connector InletEnth = input Real(unit = "kJ/kg", min = 0.01);

connector OutletFlow = output Real(unit = "kg/s", min = 0.0);
connector OutletPres = output Real(unit = "kPa", min = 0.0);
connector OutletTemp = output Real(unit = "K", min = 273.16);
connector OutletComp = output Real(unit = "kg/kg", min = 0.0, max = 0.70);
connector OutletEnth = output Real(unit = "kJ/kg", min = 0.01);

type Flowrate = Real(unit = "kg/s", min = 0.0);
type Mass = Real(unit = "kg", min = 0.0);
type Pressure = Real(unit = "kPa", min = 0.0);
type Temperature = Real(unit = "K", min = 273.16);
type Composition = Real(unit = "kg/kg", min = 0.0, max = 1.0);
type Enthalpy = Real(unit = "kJ/kg", min = 0.1);
type volume = Real(unit = "m3", min = 0.00);
type SpecificHeat = Real(unit = "kJkg-1K-1", min = 0.0);
type entropy = Real(unit = "kJkg-1K-1", min = 0.0);
type ChemicalPot = Real(unit = "kJkg-1");
type HeatRate = Real(unit = "kW");
type density = Real(unit = "kg/m3", min = 0.0);
type area = Real(unit = "m2", min = 0.0);

input InletFlow mvi;
input InletTemp Tv;
input InletEnth hv;

Flowrate mvo;
parameter Flowrate mcsi = 0.01407;
Flowrate mdso;
parameter Flowrate mcw = 0.0520;

Mass mv;
Mass Mflm;
parameter Mass Mwll = 2.3585;

output OutletPres Pabs;
parameter Pressure Pcw = 81.860;

parameter Temperature Tcsi = 72.53 + 273.15;
Temperature Tdso;
parameter Temperature Tcwi = 75.0 + 273.15;
Temperature Tcwo;
```

```
Temperature Twll;

Real dTmflm(unit = "K");
Real dTmtub(unit = "K");

parameter Composition xcsi = 0.5444;
Composition xdso;
Composition xeq;

parameter Enthalpy hcsi = 173.44;
Enthalpy hdso;

entropy sv;
ChemicalPot muw;

parameter SpecificHeat Cpwll = 0.460;
parameter SpecificHeat Cpcw = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.cp_pT(1000*Pcw, Tcwi
    )/1000;

parameter density rhocw = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.rho_pT(1000*Pcw, Tcwi);
density rhods;
parameter density rhocs = libr_rho(100*xcsi, Tcsi);

parameter volume Vshell = 0.026401;
parameter volume Vtub = 9.7833e-4;

HeatRate Qflm;
HeatRate Qtub;

parameter Real R(unit = "kJkg-1K-1") = 0.46152;
parameter Real UA(unit = "kW/K") = 0.796691;
parameter Real k(unit = "m/s") = 7.2e-6;
parameter area A = 0.4033;
Real delta(unit = "m");
Real dhdx(unit = "kJ.kg-1/(kg.kg-1)");

equation
der(Mflm) = mcsi - mdso + mvo;
der(xdso*Mflm) = xcsi*mcsi - xdso*mdso;
der(Mflm*hdso - delta*A*Pabs) = mcsi*hcsi - mdso*hdso + mvo*hv - Qflm;
hdso = libr_h(100*xdso, Tdso, Pabs);
delta = libr_delta(Tcsi, 100*xcsi, mcsi);

der(mv) = mvi - mvo;
mvo = k*rhods*A*(xdso - xeq);
rhods = libr_rho(100*xdso, Tdso);
xeq = libr_x(-muw, 100*xcsi, Tdso, Pabs);
muw = hv - Tv*sv;
sv = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.sv_p(1000*Pabs)/1000;
```

```
Vshell*der(Pabs) = R*(mv*der(Tv) + Tv*der(mv));

Mwll*Cpwll*der(Twll) = Qflm - Qtub;
Vtub*rhocw*Cpcw*der(Tcwo) = mcw*Cpcw*(Tcwi - Tcwo) + Qtub;

Qflm = (hv - hcsi + xdso*dhdx)*mdso;
dhdx = libr_dhdx(100*xdso, Tdso, Pabs);

Qflm = UA*dTmflm;
dTmflm = 0.5*((Tcsi - Twll) + (Tdso - Twll));
Qtub = UA*dTmtub;
dTmtub = 0.5*((Twll - Tcwi) + (Twll - Tcwo));

initial equation
xdso = 0.5444 - 1e-6;
Pabs = 25.0;
Twll = 0.5*(Tcwi + Tdso);
Tcwo = Tcwi + 0.01;
Tdso = Tcsi + 0.01;
Mflm = delta*A*rhocs;

end AbsMode;
```

Código 2: Modelado del Evaporador

```
model EvpMode
type Mass = Real(unit = "kg", min = 0.0);
type Flowrate = Real(unit = "kg/s", min =0.0);
type Pressure = Real(unit = "kPa", min =0.0);
type Temperature = Real(unit = "K", min = 273.16);
type Enthalpy = Real(unit = "kJ/kg", min = 0.01);
type Density = Real(unit = "kgm-3", min = 0.0);
type Volume  = Real(unit = "m3", min = 0.0);
type Heatrate = Real(unit = "kW");
type SpecificHeat = Real(unit = "kJkg-1K-1", min = 0.0);
type CoefHeatTrans = Real(unit = "kW/K", min = 0.0);

connector InletFlow = input Real(unit = "kg/s", min = 0.0);
connector InletPres = input Real(unit = "kPa", min = 0.0);
connector InletTemp = input Real(unit = "K", min = 273.16);

connector InletEnth = input Real(unit = "kJ/kg", min = 0.01);
connector OutletFlow = output Real(unit = "kg/s", min = 0.0);
connector OutletPres = output Real(unit = "kPa", min = 0.0);
connector OutletTemp = output Real(unit = "K", min = 273.16);

connector OutletEnth = output Real(unit = "kJ/kg", min = 0.01);
//Experimental DATA were taken from Canela-Sanchez et al. (2018)
parameter Flowrate mli =  0.00089;
output OutletFlow mvo;
parameter Flowrate mhw = 0.126;

output OutletPres Pevp;
parameter Pressure Phw = 81.86;

parameter Temperature Tli = 35.95 + 273.15;
output OutletTemp Tvo;
Temperature Twll;
parameter Temperature Thwi = 76.81 + 273.15;
Temperature Thwo;

parameter Enthalpy hli = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.hl_p(
    Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.BaseIF97.Basic.psat(Tli))/1000;
output OutletEnth hvo;
Enthalpy hflm;

Heatrate Qflm;
Heatrate Qtub;

Density rhoflm;
parameter Density rhohw = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.rho_pT(1000*Phw, Thwi);

parameter Mass Mwll = 1.0842;
parameter SpecificHeat Cpwll = 0.460;
```

```
parameter SpecificHeat Cphw = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.cp_pT(1000*Phw, Thwi
    )/1000;

parameter Volume Vshell = 0.026401;
parameter Volume Vtub = 4.50e-4;

parameter CoefHeatTrans UAflm = 0.063897;
parameter CoefHeatTrans UAtub = 0.063897;

Real dTmFlm(unit = "K");
Real dTmTub(unit = "K");

Real x(unit = "kg/kg", min = 0.0, max = 1.0);
parameter Real Rw(unit = "kJkg-1K-1") = 0.46152;

equation
//Mass balance
Vshell*der(rhoflm) = mli - mvo;
//Film energy balance
der(rhoflm*hflm - Pevp*Vshell) = mli*hli - mvo*hvo + Qflm;
//General Lumped Capacitance Method
Mwll*Cpwll*der(Twll) = Qtub - Qflm;
//Tube energy balance
Vtub*rhohw*Cphw*der(Thwo) = mhw*Cphw*(Thwi - Thwo) - Qtub;
//HeatTransfer Equations
Qflm = UAflm*dTmFlm;
dTmFlm = 0.5*( (Twll - Tli) + (Twll - Tvo) );
Qtub = UAtub*dTmTub;
dTmTub = 0.5*( (Thwi - Twll) + (Thwo - Twll) );
//State equations
der(rhoflm) = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.ddhp(1000*Pevp, 1000*hflm)*der(hflm)
     + Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.ddph(1000*Pevp, 1000*hflm)*der(Pevp);
//Vshell*der(Pevp) = Rw*(mvo*der(Tvo) + Tvo*der(mvo));

rhoflm = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.rho_ph(1000*Pevp, 1000*hflm);
hflm = (1-x)*(Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.hl_p(1000*Pevp)/1000) + x*hvo;
hvo = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.hv_p(1000*Pevp)/1000;
Tvo = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.BaseIF97.Basic.tsat(1000*Pevp);

initial equation

Pevp = 30.0;
Thwo = Thwi - 1e-6;
Twll = 0.5*(Thwi + Tli);
x = 1e-6;

end EvpMode;
```

Código 3: Modelado del componente Dúplex Evaporador - Absorbedor

```
model EVABMode
Real Pshell(unit = "kPa", min = 0.0);
AbsMode Absorber;
EvpMode Evaporator;

equation
connect(Evaporator.mvo, Absorber.mvi);
connect(Evaporator.Tvo, Absorber.Tv);
connect(Evaporator.hvo, Absorber.hv);
Pshell = 0.5*(Evaporator.Pevp + Absorber.Pabs);

end EVABMode;
```

Código 4: Modelado del generador

```
model GenMode
type Flowrate = Real(unit = "kg/s", min = 0.0);
type Mass = Real(unit = "kg", min = 0.0);
type Pressure = Real(unit = "kPa", min = 0.0);
type Temperature = Real(unit = "K", min = 273.16);
type Composition = Real(unit = "kg/kg", min = 0.0, max = 1.0);
type Enthalpy = Real(unit = "kJ/kg", min = 0.1);
type Volume = Real(unit = "m3", min = 0.00);
type SpecificHeat = Real(unit = "kJkg-1K-1", min = 0.0);
type Entropy = Real(unit = "kJkg-1K-1", min = 0.0);
type ChemicalPot = Real(unit = "kJkg-1");
type Heatrate = Real(unit = "kW");
type Density = Real(unit = "kg/m3", min = 0.0);

connector OutletFlow = output Flowrate;
connector OutletPres = output Pressure;
connector OutletTemp = output Temperature;
connector OutletEnth = output Enthalpy;

Mass Mflm;
Mass mv;
parameter Mass Mwll = 8.0565;
parameter Flowrate mdsi = 0.0202;
Flowrate mcso;
Flowrate mvoflm;
Flowrate mvishell;
output OutletFlow mvoshell;
parameter Flowrate mhw = 0.1248;

Pressure Pgen;
parameter Pressure Ptub = 99.100;

parameter Temperature Tdsi = 69.36 + 273.15;
Temperature Tcso;
output OutletTemp Tvo;
Temperature Twll;
parameter Temperature Thwi = 273.15 + 88.0;
Temperature Thwo;
Temperature Tsat;

parameter Composition xdsi = 0.508;
Composition xcso;

parameter Enthalpy hdsi = libr_h(100*xdsi, Tdsi, 10.83);
Enthalpy hcso;
output OutletEnth hvo;
Enthalpy hmix;

parameter SpecificHeat Cphw = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.cp_pT(1000* Ptub,
```

```
    Thwi)/1000;
parameter SpecificHeat Cpwll = 0.460;

Entropy svo;

ChemicalPot muw;

parameter Volume Vshell = 0.046152;
parameter Volume Vtub = 8.3813e-4;

Heatrate Qflm;
Heatrate Qtub;

Density rhomix;
Density rhocs;
Density rhov;
parameter Density rhohw = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.rho_pT(1000*Ptub, Thwi);

parameter Real UA(unit = "kW/K") = 0.27;
parameter Real A(unit = "m2") = 0.5893;
Real delta(unit = "m");
Real dTmFlm(unit = "K");
Real dTmTub(unit = "K");
parameter Real Rw(unit = "kJ.kg-1.K-1") = 8.3144626 / 18.01528;
Real q(unit = "kg.kg-1", min = 0.0, max = 1.0);
parameter Pressure Pcnd = 5.0;
parameter Real r(unit = "m") = 2.54e-2;

equation
svo = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.s_pT(1000*Pgen, Tvo)/1000;
muw = hvo - Tvo*svo "Chemical Potential criteria";
Tsat = libr_Tx(hvo, svo, 100*xdsi, Pgen);

Mflm = delta*A*rhocs;
delta = libr_delta(Tcso, 100*xcso, mdsi);

if inRegionCheck(Tcso, Tsat) then
  der(Mflm) = mdsi - mcso - mvoflm "Material balance film side";
  der(xcso*Mflm) = xdsi*mdsi - xcso*mcso "Specia balance film side";
  xcso = libr_x(-muw, xdsi, Tcso, Pgen);
else
  der(Mflm) = mdsi - mcso;
  mvoflm = 0.0;
  xcso = xdsi;
end if;

der(mv) = mvishell - mvoshell "Material balance shell side";
mvoflm = mvishell;
mvoshell = (2)^(0.5)*(3.1416)*r^2*rhov*(1000*(Pgen - Pcnd)/(rhov))^(0.5) "Bernoulli
    principle";
```

```
Vshell*der(Pgen) = Rw*(mv*der(Tvo) + Tvo*der(mv)) "Ideal Gas behavior";

Mwll*Cpwll*der(Twll) = Qtub - Qflm "General Lumped method";
Qtub = UA*dTmTub "Heat transfer tube side";
dTmTub = 0.5*((Thwi-Twll)+(Thwo - Twll));
Qflm = UA*dTmFlm "Heat transfer film side";
dTmFlm = 0.5*((Twll - Tdsi)+(Twll - Tcso));

Vshell*der(rhomix*hmix - Pgen) = mdsi*hdsi - mcso*hcso - mvoshell*hvo + Qflm "Shell
    side energy balance";
der(rhocs) = libr_drhodT(100*xcso, Tcso)*der(Tcso) + libr_drhodx(100*xcso, Tcso)*der(
    xcso);


hmix = (1-q)*hcso + q*hvo;
hcso = libr_h(100*xcso, Tcso, Pgen);
//der(hcso) = libr_dhdP(100*xcso, Tcso)*der(Pgen) + libr_dhdT(100*xcso, Tcso, Pgen)*
    der(Tvo) + libr_dhdx(100*xcso, Tcso, Pgen)*der(xcso);
hvo = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.h_pT(1000*Pgen, Tvo)/1000;

rhomix = (1-q)*rhocs + q*rhov;
rhocs = libr_rho(100*xcso, Tcso);
rhov = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.rho_ph(1000*Pgen, 1000*hvo);

Tvo = Tcso;

Vtub*rhohw*Cphw*der(Thwo) = mhw*Cphw*(Thwi - Thwo) - Qtub;

initial equation
q = mvoflm/(mvoflm + mcso);
Twll = 0.5*(Thwi + Tdsi);
Tcso = Tdsi + 1e-6;
Thwo = Thwi - 1e-6;
Pgen = 30.0;//10.83;

end GenMode;
```

Código 5: Modelado del condensador

```
model CndMode
type Mass = Real(unit = "kg", min = 0.0);
type Flowrate = Real(unit = "kg/s", min = 0.0);
type Pressure = Real(unit = "kPa", min = 0.0);
type Temperature = Real(unit = "K", min = 273.15);
type Enthalpy = Real(unit = "kJ/kg", min = 0.01);
type density = Real(unit = "kgm-3", min = 0.0);
type volume = Real(unit = "m3", min = 0.0);
type Heatrate = Real(unit = "kW");
type SpecHeat = Real(unit = "kJkg-1K-1", min = 0.01);
type CoefHeatTrans = Real(unit = "kW/K", min = 0.01);

parameter Flowrate mvi = 0.0006;
parameter Temperature Tvi = 61.0 + 273.15;
parameter Enthalpy hvi = 2614.18;

Flowrate mlo;
Temperature Tlo;
Enthalpy hlo;

parameter Mass Mwll = 7.3398;
parameter SpecHeat Cpwll = 0.460;
Temperature Twll;

output OutletPres Pcnd;
density rhoflm;
Enthalpy hflm;
Heatrate Qflm;
Heatrate Qtub;
parameter CoefHeatTrans UAflm = 0.1245184;
parameter CoefHeatTrans UAtub = 0.1245184;

Real dTmFlm(unit="K");
Real dTmTub(unit="K");
parameter volume Vshell = 0.046152;
parameter volume Vtub = 9.30e-4;
parameter Flowrate mcw = 0.1189;
parameter Temperature Tcwi = 28.5 + 273.15;
Temperature Tcwo;
parameter density rhocw = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.rho_pT(101325, Tcwi);
parameter SpecHeat Cpcw =  Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.cp_pT(101325, Tcwi)
    /1000;
Real x(unit = "kg/kg");

equation
Vshell*der(rhoflm) = mvi - mlo "Mass balance";
der(rhoflm) = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.ddph(1000*Pcnd, 1000*hflm)*der(Pcnd)
     + der(hflm)*Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.ddhp(1000*Pcnd, 1000*hflm);
```

```
Vshell*(rhoflm*der(hflm) + hflm*der(rhoflm) - der(Pcnd)) = mvi*hvi - mlo*hlo - Qflm "
    Energy balance (Film side)";
Mwll*Cpwll*der(Twll) = Qflm - Qtub "Energy balance (Wall side)";
Vtub*rhocw*Cpcw*der(Tcwo) = mcw*Cpcw*(Tcwi - Tcwo) + Qtub "Energy balance (Tube side)"
    ;
//Heat Transfer Equations
Qflm = UAflm*dTmFlm;
dTmFlm = 0.5*((Tvi - Twll) + (Tlo - Twll));
Qtub = UAtub*dTmTub;
dTmTub = 0.5*((Twll - Tcwi) + (Twll - Tcwo));
//IAPWS-97 formulation
Tlo = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.BaseIF97.Basic.tsat(1000*Pcnd);
hlo = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.hl_p(1000*Pcnd)/1000;
hflm = (1-x)*hlo + x*Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.hv_p(1000*Pcnd)/1000;
rhoflm = Modelica.Media.Water.IF97_Utilities.rho_ph(1000*Pcnd, 1000*hflm);

initial equation
Pcnd = 30.0;
Tcwo = Tcwi + 0.5;
x = 0.9999;
Twll = 0.5*(Tcwi + Tvi);

end CndMode;
```

Código 6: Código en lenguaje C para obtención de entalpía de solución LiBr a partir de $h_{LiBr} = h(x, T, P)$

```
double libr_h(double x, double T, double p){
 double hLiBr = 0.0;
 double T0 = 220.0;
 double A[] = { 5.506219979E+3,  5.213228937E+2, 7.774930356    , -4.575233382E-2,
    -5.792935726E+2 };
 double B[] = { 1.452749674E+2, -4.984840771E-1, 8.836919180E-2 , -4.870995781E-4,
    -2.905161205 };
 double C[] = { 2.648364473E-2, -2.311041091E-3, 7.559736620E-6 , -3.763934193E-8,
    1.176240649E-3 };
 double D[] = {-8.526516950E-6,  1.320154794E-6, 2.791995438E-11, 0.00, -8.511514931E
    -7};
 double E[] = {-3.840447174E-11, 2.625469387E-11};
 double F[] = {-5.159906276E+1,  1.114573398};
 double L[] = {-2.183429482E+3, -1.266985094E+2, -2.364551372,     1.389414858E-2,
    1.583405426E+2 };
 double M[] = {-2.267095847E+1,  2.983764494E-1, -1.259393234E-2,  6.849632068E-5,
    2.767986853E-1 };
 double V[] = { 1.176741611E-3, -1.002511661E-5, -1.695735875E-8, -1.497186905E-6,
    2.538176345E-8,     5.815811591E-11, 3.057997846E-9, -5.129589007E-11};


 hLiBr =  A[0]  + A[1]*x + A[4]*pow(x,1.1) + A[2]*pow(x,2) + A[3]*pow(x,3) +
                        (B[0] + B[1]*x + B[4]*pow(x,1.1) + B[2]*pow(x,2) + B[3]*pow(x
                            ,3))*T +
                        (L[0] + L[1]*x + L[4]*pow(x,1.1) + L[2]*pow(x,2) + L[3]*pow(x
                            ,3))*log(T) +
                        (V[0] + T*V[3] + V[1]*x + (pow(T,2))*V[6] + T*V[4]*x + V[2]*
                            pow(x,2) + (pow(T,2))*V[7]*x + T*V[5]*pow(x,2))*p +
                        (C[0] + C[1]*x + C[4]*pow(x,1.1) + C[2]*pow(x,2) + C[3]*pow(x
                            ,3))*(pow(T,2)) +
                        (-B[0] - M[0] + (F[0] + F[1]*x) / (pow((T - T0),2)) +
                        (-L[0] - L[1]*x - L[4]*pow(x,1.1) - L[2]*pow(x,2) - L[3]*pow(x
                            ,3)) / T
                        - B[1]*x - M[1]*x - B[4]*pow(x,1.1) - M[4]*pow(x,1.1) - B[2]*
                            pow(x,2) - M[2]*pow(x,2) - B[3]*pow(x,3) - M[3]*pow(x,3)
                        - (V[3] + 2*T*V[6] + V[4]*x + 2*T*V[7]*x + V[5]*pow(x,2))*p
                        - 2*(C[0] + C[1]*x + C[4]*pow(x,1.1) + C[2]*pow(x,2) + C[3]*
                            pow(x,3))*T
                        - 3*(D[0] + D[1]*x + D[4]*pow(x,1.1) + D[2]*pow(x,2))*(pow(T
                            ,2))
                        - 4*(E[0] + E[1]*x)*(pow(T,3))
                        - (M[0] + M[1]*x + M[4]*pow(x,1.1) + M[2]*pow(x,2) + M[3]*pow(
                            x,3))*log(T))*T
                        + (D[0] + D[1]*x + D[4]*pow(x,1.1) + D[2]*pow(x,2))*(pow(T,3))
                        + (E[0] + E[1]*x)*(pow(T,4))
                        + (M[0] + M[1]*x + M[4]*pow(x,1.1) + M[2]*pow(x,2) + M[3]*pow(
                            x,3))*T*log(T) + (F[0] + F[1]*x) / (T - T0);
 return hLiBr;
}
```

Código 7: Código en lenguaje C para obtención de $\frac{\partial h}{\partial x} = f(x, T, P)$

```
double libr_dhdx(double x, double T, double p){
 double dhdx = 0.0;
 double T0 = 220.0;
 double A[] = { 5.506219979E+3,  5.213228937E+2, 7.774930356    , -4.575233382E-2,
    -5.792935726E+2 };
 double B[] = { 1.452749674E+2, -4.984840771E-1, 8.836919180E-2 , -4.870995781E-4,
    -2.905161205 };
 double C[] = { 2.648364473E-2, -2.311041091E-3, 7.559736620E-6 , -3.763934193E-8,
    1.176240649E-3 };
 double D[] = {-8.526516950E-6,  1.320154794E-6, 2.791995438E-11, 0.00, -8.511514931E
    -7};
 double E[] = {-3.840447174E-11, 2.625469387E-11};
 double F[] = {-5.159906276E+1,  1.114573398};
 double L[] = {-2.183429482E+3, -1.266985094E+2, -2.364551372,     1.389414858E-2,
    1.583405426E+2 };
 double M[] = {-2.267095847E+1,  2.983764494E-1, -1.259393234E-2,  6.849632068E-5,
    2.767986853E-1 };
 double V[] = { 1.176741611E-3, -1.002511661E-5, -1.695735875E-8, -1.497186905E-6,
    2.538176345E-8,
                      5.815811591E-11, 3.057997846E-9, -5.129589007E-11};

 dhdx = A[1] + F[1] / (T - T0) + 1.1*A[4]*pow(x,0.1) + 2*A[2]*x + 3*A[3]*pow(x,2) + (B
    [1] + 1.1*B[4]*pow(x,0.1)
        + 2*B[2]*x + 3*B[3]*pow(x,2))*T + (L[1] + 1.1*L[4]*pow(x,0.1) + 2*L[2]*x + 3*L
            [3]*pow(x,2))*log(T)
        + (V[1] + T*V[4] + 2*V[2]*x + pow(T,2)*V[7] + 2*T*V[5]*x)*p + (C[1] + 1.1*C
            [4]*pow(x,0.1) + 2*C[2]*x + 3*C[3]*pow(x,2))*pow(T,2)
        + (-B[1] - M[1] + (-L[1] - 1.1*L[4]*pow(x,0.1) - 2*L[2]*x - 3*L[3]*pow(x,2)) /
             T + F[1] / pow((T - T0),2)
        - 1.1*B[4]*pow(x,0.1) - 1.1*M[4]*pow(x,0.1) - 2*B[2]*x - 2*M[2]*x - 3*B[3]*pow
            (x,2) - 3*M[3]*pow(x,2)
        - (V[4] + 2*T*V[7] + 2*V[5]*x)*p - 2*(C[1] + 1.1*C[4]*pow(x,0.1) + 2*C[2]*x +
            3*C[3]*pow(x,2))*T
        - 3*(D[1] + 1.1*D[4]*pow(x,0.1) + 2*D[2]*x)*pow(T,2) - 4*E[1]*pow(T,3) - (M[1]
             + 1.1*M[4]*pow(x,0.1)
        + 2*M[2]*x + 3*M[3]*pow(x,2))*log(T))*T + (D[1] + 1.1*D[4]*pow(x,0.1) + 2*D
            [2]*x)*pow(T,3) + E[1]*pow(T,4)
        + (M[1] + 1.1*M[4]*pow(x,0.1) + 2*M[2]*x + 3*M[3]*pow(x,2))*T*log(T);

 return dhdx;
}
```

Código 8: Código en lenguaje C para obtención de la densidad de solución LiBr a partir de $\rho_{LiBr} = \rho(x, T, P)$

```
double libr_rho(double x, double T){
        double v = 0.0, rho = 0.0;
        double V[] = { 1.176741611E-3, -1.002511661E-5, -1.695735875E-8, -1.497186905E
            -6,  2.538176345E-8,     5.815811591E-11, 3.057997846E-9, -5.129589007E
            -11};
        v = V[0] + V[1]*x + V[2]*pow(x,2) + V[3]*T + V[4]*x*T + V[5]*pow(x,2)*T + V
            [6]*pow(T,2) + V[7]*x*pow(T,2) ;
        rho = 1/v;
        return rho;
}
```

Código 9: Código en lenguaje C para obtención de la concentración de LiBr a partir de $\mu^v_{H_2O} = \mu^l_{H_2O}$

```
double libr_x(double uw, double x, double T, double p){
        double f = 0.0, duwdx = 0.0;
        double T0 = 220.0;
        double A[] = { 5.506219979E+3,  5.213228937E+2, 7.774930356    , -4.575233382E
            -2, -5.792935726E+2 };
        double B[] = { 1.452749674E+2, -4.984840771E-1, 8.836919180E-2 , -4.870995781E
            -4, -2.905161205  };
        double C[] = { 2.648364473E-2, -2.311041091E-3, 7.559736620E-6 , -3.763934193E
            -8,  1.176240649E-3 };
        double D[] = {-8.526516950E-6,  1.320154794E-6, 2.791995438E-11, 0.00 ,
            -8.511514931E-7};
        double E[] = {-3.840447174E-11, 2.625469387E-11};
        double F[] = {-5.159906276E+1,  1.114573398};
        double L[] = {-2.183429482E+3, -1.266985094E+2, -2.364551372,     1.389414858E
            -2,  1.583405426E+2 };
        double M[] = {-2.267095847E+1,  2.983764494E-1, -1.259393234E-2,  6.849632068E
            -5,  2.767986853E-1 };
        double V[] = { 1.176741611E-3, -1.002511661E-5, -1.695735875E-8, -1.497186905E
            -6,  2.538176345E-8,     5.815811591E-11, 3.057997846E-9, -5.129589007E
            -11};

        double xLiBr = 0.0, xLiBri = 0.0;
        double alpha = 1.0;
        double tol = 1e-6;
        double error = 10;

        xLiBr = x;

        while(error>tol){
                f = +( A[0] + (F[0] + F[1]*xLiBr) / (T - T0) + A[1]*xLiBr + A[4]*pow(
                    xLiBr,1.1) + A[2]*pow(xLiBr,2) + A[3]*pow(xLiBr,3) +
                 (B[0] + B[1]*xLiBr + B[4]*pow(xLiBr,1.1) + B[2]*pow(xLiBr,2) + B[3]*
                     pow(xLiBr,3))*T + (L[0] + L[1]*xLiBr + L[4]*pow(xLiBr,1.1) + L
                     [2]*pow(xLiBr,2) + L[3]*pow(xLiBr,3))*log(T) +
                 (V[0] + T*V[3] + V[1]*xLiBr + pow(T,2)*V[6] + T*V[4]*xLiBr + V[2]*pow
                     (xLiBr,2) + pow(T,2)*V[7]*xLiBr + T*V[5]*pow(xLiBr,2))*p + (C[0]
                     + C[1]*xLiBr + C[4]*pow(xLiBr,1.1) +
                 C[2]*pow(xLiBr,2) + C[3]*pow(xLiBr,3))*pow(T,2) -
                 (A[1] + F[1] / (T - T0) + 1.1*A[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*A[2]*xLiBr + 3*
                     A[3]*pow(xLiBr,2) + (B[1] + 1.1*B[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*B[2]*
                     xLiBr + 3*B[3]*pow(xLiBr,2))*T +
                 (L[1] + 1.1*L[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*L[2]*xLiBr + 3*L[3]*pow(xLiBr,2))
                     *log(T) + (V[1] + T*V[4] + 2*V[2]*xLiBr + pow(T,2)*V[7] + 2*T*V
                     [5]*xLiBr)*p +
                 (C[1] + 1.1*C[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*C[2]*xLiBr + 3*C[3]*pow(xLiBr,2))
                     *pow(T,2) + (D[1] + 1.1*D[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*D[2]*xLiBr)*pow(T
                     ,3) + E[1]*pow(T,4) +
                 (M[1] + 1.1*M[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*M[2]*xLiBr + 3*M[3]*pow(xLiBr,2))
```

```
                *T*log(T))*xLiBr + (D[0] + D[1]*xLiBr + D[4]*pow(xLiBr,1.1) + D
                [2]*pow(xLiBr,2))*pow(T,3) +
            (E[0] + E[1]*xLiBr)*pow(T,4) + (M[0] + M[1]*xLiBr + M[4]*pow(xLiBr
                ,1.1) + M[2]*pow(xLiBr,2) + M[3]*pow(xLiBr,3))*T*log(T) )
            + uw;

        duwdx = +(1.1*A[4]*pow(xLiBr,0.1) - 1.1*A[4]*pow(xLiBr,0.1) - (B[1] +
            1.1*B[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*B[2]*xLiBr + 3*B[3]*pow(xLiBr,2))*T +
                (B[1] + 1.1*B[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*B[2]*xLiBr + 3*B[3]*pow(
                    xLiBr,2))*T - (L[1] + 1.1*L[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*L[2]*
                    xLiBr + 3*L[3]*pow(xLiBr,2))*log(T) +
                (L[1] + 1.1*L[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*L[2]*xLiBr + 3*L[3]*pow(
                    xLiBr,2))*log(T) + (C[1] + 1.1*C[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*C
                    [2]*xLiBr + 3*C[3]*pow(xLiBr,2))*pow(T,2) -
                (C[1] + 1.1*C[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*C[2]*xLiBr + 3*C[3]*pow(
                    xLiBr,2))*pow(T,2) - (2*A[2] + (0.11*A[4]) / pow(xLiBr
                    ,0.9) + 6*A[3]*xLiBr +
                (2*B[2] + (0.11*B[4]) / pow(xLiBr,0.9) + 6*B[3]*xLiBr)*T + (2*
                    L[2] + (0.11*L[4]) / pow(xLiBr,0.9) + 6*L[3]*xLiBr)*log(T)
                     +
                (2*V[2] + 2*T*V[5])*p + (2*C[2] + (0.11*C[4]) / pow(xLiBr,0.9)
                     + 6*C[3]*xLiBr)*pow(T,2) + (2*D[2] + (0.11*D[4]) / pow(
                    xLiBr,0.9))*pow(T,3) +
                (2*M[2] + (0.11*M[4]) / pow(xLiBr,0.9) + 6*M[3]*xLiBr)*T*log(T
                    ))*xLiBr - (D[1] + 1.1*D[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*D[2]*xLiBr)
                    *pow(T,3) + (D[1] + 1.1*D[4]*pow(xLiBr,0.1) +
                2*D[2]*xLiBr)*pow(T,3) - (M[1] + 1.1*M[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*M
                    [2]*xLiBr + 3*M[3]*pow(xLiBr,2))*T*log(T) + (M[1] + 1.1*M
                    [4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*M[2]*xLiBr +
                3*M[3]*pow(xLiBr,2))*T*log(T));

        xLiBri = xLiBr - alpha*f/duwdx;
        error = xLiBri - xLiBr;
        if(error<0){
                error = -1*error;
        }
        xLiBr = xLiBri;
    }

    return xLiBr/100;
}
```

Código 10: Código en lenguaje C para obtención de la temperatura de equilibrio de LiBr a partir de $\mu^v_{H_2O} = \mu^l_{H_2O}$

```
double libr_Tx(double hVp, double sVp, double xLiBr, double p){
        double f = 0.0, dfdT = 0.0;
        double T0 = 220.0;
        double A[] = { 5.506219979E+3,  5.213228937E+2, 7.774930356    , -4.575233382E
            -2, -5.792935726E+2 };
        double B[] = { 1.452749674E+2, -4.984840771E-1, 8.836919180E-2 , -4.870995781E
            -4, -2.905161205  };
        double C[] = { 2.648364473E-2, -2.311041091E-3, 7.559736620E-6 , -3.763934193E
            -8,  1.176240649E-3 };
        double D[] = {-8.526516950E-6,  1.320154794E-6, 2.791995438E-11, 0.00,
            -8.511514931E-7};
        double E[] = {-3.840447174E-11, 2.625469387E-11};
        double F[] = {-5.159906276E+1,  1.114573398};
        double L[] = {-2.183429482E+3, -1.266985094E+2, -2.364551372,     1.389414858E
            -2,  1.583405426E+2 };
        double M[] = {-2.267095847E+1,  2.983764494E-1, -1.259393234E-2,  6.849632068E
            -5,  2.767986853E-1 };
        double V[] = { 1.176741611E-3, -1.002511661E-5, -1.695735875E-8, -1.497186905E
            -6,  2.538176345E-8,     5.815811591E-11, 3.057997846E-9, -5.129589007E
            -11};

        double Ti = 350.0;
        double T = 350.0;
        double alpha = 1.0;
        double tol = 1e-6;
        double error = 10;

        while(error>tol){
                f = hVp - T*sVp -( A[0] + (F[0] + F[1]*xLiBr) / (T - T0) + A[1]*xLiBr
                    + A[4]*pow(xLiBr,1.1) + A[2]*pow(xLiBr,2) + A[3]*pow(xLiBr,3) +
                 (B[0] + B[1]*xLiBr + B[4]*pow(xLiBr,1.1) + B[2]*pow(xLiBr,2) + B[3]*
                     pow(xLiBr,3))*T + (L[0] + L[1]*xLiBr + L[4]*pow(xLiBr,1.1) + L
                     [2]*pow(xLiBr,2) + L[3]*pow(xLiBr,3))*log(T) +
                 (V[0] + T*V[3] + V[1]*xLiBr + pow(T,2)*V[6] + T*V[4]*xLiBr + V[2]*pow
                     (xLiBr,2) + pow(T,2)*V[7]*xLiBr + T*V[5]*pow(xLiBr,2))*p + (C[0]
                     + C[1]*xLiBr + C[4]*pow(xLiBr,1.1) +
                 C[2]*pow(xLiBr,2) + C[3]*pow(xLiBr,3))*pow(T,2) -
                 (A[1] + F[1] / (T - T0) + 1.1*A[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*A[2]*xLiBr + 3*
                     A[3]*pow(xLiBr,2) + (B[1] + 1.1*B[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*B[2]*
                     xLiBr + 3*B[3]*pow(xLiBr,2))*T +
                 (L[1] + 1.1*L[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*L[2]*xLiBr + 3*L[3]*pow(xLiBr,2))
                     *log(T) + (V[1] + T*V[4] + 2*V[2]*xLiBr + pow(T,2)*V[7] + 2*T*V
                     [5]*xLiBr)*p +
                 (C[1] + 1.1*C[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*C[2]*xLiBr + 3*C[3]*pow(xLiBr,2))
                     *pow(T,2) + (D[1] + 1.1*D[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*D[2]*xLiBr)*pow(T
                     ,3) + E[1]*pow(T,4) +
                 (M[1] + 1.1*M[4]*pow(xLiBr,0.1) + 2*M[2]*xLiBr + 3*M[3]*pow(xLiBr,2))
                     *T*log(T))*xLiBr + (D[0] + D[1]*xLiBr + D[4]*pow(xLiBr,1.1) + D
```

```
                    [2]*pow(xLiBr,2))*pow(T,3) +
                (E[0] + E[1]*xLiBr)*pow(T,4) + (M[0] + M[1]*xLiBr + M[4]*pow(xLiBr
                    ,1.1) + M[2]*pow(xLiBr,2) + M[3]*pow(xLiBr,3))*T*log(T) );

            dfdT = -sVp - (B[0] + M[0] + (-F[0] - F[1]*xLiBr) / pow((T - T0), 2) +
                 (L[0] + L[1]*xLiBr + L[4]*pow(xLiBr, 1.1) + L[2]*pow(xLiBr, 2) +
                L[3]*pow(xLiBr, 3)) / T + B[1]*xLiBr + M[1]*xLiBr + B[4]*pow(xLiBr
                , 1.1) + M[4]*pow(xLiBr, 1.1) + B[2]*pow(xLiBr, 2) + M[2]*pow(
                xLiBr, 2) +
            B[3]*pow(xLiBr, 3) + M[3]*pow(xLiBr, 3) + (V[3] + 2*T*V[6] + V[4]*
                xLiBr + 2*T*V[7]*xLiBr + V[5]*pow(xLiBr, 2))*p + 2*(C[0] + C[1]*
                xLiBr + C[4]*pow(xLiBr, 1.1) + C[2]*pow(xLiBr, 2) + C[3]*pow(xLiBr
                , 3))*T - (B[1] + M[1] + (-F[1]) / pow((T - T0),2) +
            (L[1] + 1.1*L[4]*pow(xLiBr, 0.1) + 2*L[2]*xLiBr + 3*L[3]*pow(xLiBr, 2)
                ) / T + 1.1*B[4]*pow(xLiBr, 0.1) + 1.1*M[4]*pow(xLiBr, 0.1) + 2*B
                [2]*xLiBr + 2*M[2]*xLiBr + 3*B[3]*pow(xLiBr, 2) + 3*M[3]*pow(xLiBr
                , 2) + (V[4] + 2*T*V[7] + 2*V[5]*xLiBr)*p + 2*(C[1] + 1.1*C[4]*pow
                (xLiBr, 0.1) +
            2*C[2]*xLiBr + 3*C[3]*pow(xLiBr, 2))*T + 3*(D[1] + 1.1*D[4]*pow(xLiBr,
                 0.1) + 2*D[2]*xLiBr)*pow(T,  2) + 4*E[1]*pow(T,  3) + (M[1] +
                1.1*M[4]*pow(xLiBr, 0.1) + 2*M[2]*xLiBr + 3*M[3]*pow(xLiBr, 2))*
                log(T))*xLiBr + 3*(D[0] + D[1]*xLiBr + D[4]*pow(xLiBr, 1.1) + D
                [2]*pow(xLiBr, 2))*pow(T,  2) +
            4*(E[0] + E[1]*xLiBr)*pow(T,  3) + (M[0] + M[1]*xLiBr + M[4]*pow(xLiBr
                , 1.1) + M[2]*pow(xLiBr, 2) + M[3]*pow(xLiBr, 3))*log(T));

            Ti = T - alpha*f/dfdT;
            error = Ti - T;
            if(error<0){
                    error = -1*error;
            }
            T = Ti;
        }

        return T;
}
```

Código 11: Función para obtención de la densidad de solución LiBr acuosa (Modelica)

```
function libr_rho
input Real x(unit = "kg/kg", min = 0.0, max = 1.0);
input Real T(unit = "K", min = 273.15);
output Real rho(unit = "kg/m3", min = 0.0);
protected
  parameter Real V[8] = {1.176741611E-3, -1.002511661E-5, -1.695735875E-8,
      -1.497186905E-6, 2.538176345E-8, 5.815811591E-11, 3.057997846E-9, -5.129589007
      E-11};
  Real v;
algorithm
  v := V[1] + V[2]*x + V[3]*x^2 + V[4]*T + V[5]*x*T + V[6]*x^2*T + V[7]*T^2 + V[8]*x*T
      ^2;
  rho := 1/v;
end libr_rho;
```

Código 12: Función para la obtención de la viscosidad dinámica de solución LiBr acuosa (Modelica)

```
function libr_mu
input Real x(unit = "kg/kg", min = 0.0, max = 1.0);
input Real T(unit = "K", min = 273.15);
output Real mu(unit = "Pas", min = 0.0);
  protected
parameter Real A[2] = {-2.3212641667148, 3.190587778753};
parameter Real B[2] = {-609.44957160372, 963.16370163469};
parameter Real C[2] = {372994.85578423, -35211.99698739};
Real lnmu;
  algorithm
lnmu := A[1] + A[2]*x*x + B[1]/T + B[2]*x*x/T + C[1]/T^2 + C[2]*x*x/T^2;
mu := exp(lnmu)/1000;  //Translating cP to Pa*s
end libr_mu;
```

Código 13: Función para el cálculo del espesor del película (Modelica)

```
function libr_delta
input Real Tcsi;
input Real xcsi;
input Real mcs;
output Real delta;
protected
 parameter Real Lt = 0.8074; //A lap of helicoidal
 parameter Real lt = 10.11;   //total length tube
 parameter Real Dt = 0.0127;
 parameter Real g = 9.81;
 constant Real pi = 3.1415926535897;
 Real Gamma;
 Real mucs;
 Real rhocs;
 Real k;

algorithm
 Gamma := mcs/(2*Lt);
 mucs := libr_mu(xcsi/100, Tcsi);
 rhocs := libr_rho(xcsi, Tcsi);
 k := 1.93115;
 delta := k*(mucs*Gamma/(rhocs*rhocs*g))^(1/3);

end libr_delta;
```

Producción científica

Artículos

Parrales-Bahena A., Bello-Guadarrama M.H., Mosso-Vázquez A., Rosas-Cortez E., Juarez-Romero D. (2024). SCISPACE: A software Engine to Foster Research Work-flow. *Programación Matemática y Software*, 207-3283. Status: Aceptado.

Derechos de autor

Rosas-Cortez E., Sierra-Espinoza F.S. (2023). COUTERM CAP V1.0. *Programas de computación* Número de registro:03-2023-053010552600-01 (INDAUTOR)

SCISPACE: A Software Engine to Foster Research Work-flow

A. Mosso-Vazquez, A. Parrales, H. Bello,
E. Rosas-Cortez, D. Juarez-Romero
CIICAp-UAEM Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa,
Cuernavaca, 62209. Morelos, Mex email:djuarezr7@gmail.com

2025-02-28

Key words: Research work-flow, Semantic Search, large language Models, SciSpace, ChatGPT.

Abstract

This work analyzes the characteristics of SciSpace as a tool to assist in while writing a research. The work explores other software-tools for this purpose. This work presents the historical and the corporate development of Scispace. Also it describes the main features as compared with classic texts-books for scientific research. Then two cases of research are presented: one concerned with heat-transfer technology, and the other with cognitive aspects of category theory. The last case illustrate how Scispace serves to review a wide background of the development of a specific subject . The conclusions is that Scispace can serve to different type of users; and that it is advantageous to use this type of tool while endeavoring a written research.

1. Introduction

Language has been a fundamental element in the establishment of human civilizations, such as the Sumerian, Egyptian, Greek, and Mayan civilizations, among others, each with different forms of written and spoken language. Language can be considered an instrument of the human mind for the creation and development of science, technology, philosophy, and arts in every civilization. In each of these civilizations, humans invented graphic and sound symbols that gave rise to different languages with their own syntax and semantics through the organization of symbols in words, sentences and phrases. Language is a key element for the formation of societies in communicated human networks. But it was not always like this. The biblical story of the Tower of Babel shows that humanity, after the flood, spoke only one language when it decided to build the tower with the purpose of reaching heaven; God, seeing human pride, confused their language in such a way that they could not understand each other. Semantics had been disturbed.

In modern times, mankind has at its disposal different languages, each with elaborate syntax and semantics, not only for communication between human beings but also with their environment. With only two symbols,0 and 1, words can be formed to communicate with a computer; in biology, four symbols are used (A – adenine, C – cytosine, G – guanine, T – thymine) that make up DNA (deoxyribonucleic acid) and with which the biological software called Genome is written to create and maintain a human body; in the study of the kinematics of robotic mechanisms, four symbols are also used to communicate with the mechanics of a physical robot (a – link length, α – link twist, d – link offset, θ – joint angle), known as DH (Denavit-Hartenberg) parameters. Mathematics, physics,

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES:	ROSAS CORTEZ ERNESTO SIERRA ESPINOSA FERNANDO ZENAIDO
TÍTULO:	COUTERM CAP V1.0
RAMA:	PROGRAMAS DE COMPUTACION
TITULARES:	ROSAS CORTEZ ERNESTO SIERRA ESPINOSA FERNANDO ZENAIDO

Con fundamento en lo establecido por el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Programa de Computo.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2023-053010552600-01

Ciudad de México, a 31 de mayo de 2023

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
SECRETARÍA DE CULTURA
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR
DIRECCIÓN DEL REGISTRO PÚBLICO

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA

INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

Cuernavaca, Morelos, 12 de mayo de 2025.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: MODELADO Y SIMULACION DE UN TRANSFORMADOR TERMICO POR ABSORCION CON COMPONENTES DUPLEX, que presenta el alumno **Ernesto Rosas Cortez**, para obtener el título de la **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.**

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO.**

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ
DR. JAVIER DELGADO GONZAGA
DR. ISAAC JUSTINE CANELA SÁNCHEZ
DR. DAVID JUÁREZ ROMERO

Se adiciona efirma UAEM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

DAVID JUAREZ ROMERO | Fecha:2025-05-14 12:13:55 | FIRMANTE

pI3ZsNgxbyHvWl45AmrL9QNofYaA3Cs9hvo5E4LStWuglxM+1z6YPHE9mH30YKpZWZIhBL7EN/n7rtL1D11rCaOQOQRouIKWiVdEyth9dFPH0JOwK80y3VH79gSRuojduWHEy
epo5FyAsnoTG8OTYtkLWajzCW3isgbtCfusPSq0sEI85OnEhYh04xlj9M9WefAueFMU+C/i/TxZGv32LlCqEW3f+RErnN9xW0iEZfGaIgsI/AXfBKAiYlOpCkGXhMxciii9BGaOvL4klbJ
SsgV3KA4CWKFwCKxmB3UtLH4KOEHTWCwvYGQw/mz/ANoJKZhgq+ZZhu6EuaIYG9uLhA==

JOSE ALFREDO HERNANDEZ PEREZ | Fecha:2025-05-22 10:00:12 | FIRMANTE

d9TCKIgFHOGw2ACJKJZ3Wr4aj9/+ignHN/wiojM46PiUFp59HhI7hSv2wcrJnlDlz5KEzNzZJwLaLuHjdNOeOujzCiI9rPiV760Nmh6lCBB3Apu21FiUnQ6cA6UYbRObMM78sRCmU
3ERXPYdby7/COO523j3oi4x4RCyxhE1o3XPVE2DxKiNThqQUZogWTzTJH8RvtJ6GfJfgq9cDZy8IH3JmN870WGpWvbie07U/Wc2Bk6lPhtvjq16mqPvkjuV7iDmHEwozrXBLOGQ
1xiPMlBD5h/L0iYmcs1VhxqOzJS7rZXOaS4TJumSqTgg19pm7Qewc1nOA9JpqI7PPgslZw==

ARMANDO HUICOCHEA RODRIGUEZ | Fecha:2025-05-27 10:34:09 | FIRMANTE

JllX6wmk3slttBMUws1StqQmoQeefFCOJuEN+D+QCcy4N4LlXqoGgo+D73RiyG68rEeWBzhfJ1gI2MtMj1PDU4yzN8PXgLbxJsbhn53h1yyaVGHiXzgOG5ysGzctOqBHTMzfdPAD
9nc23icgfCFi5kSX0lY0x8nilfaK+CzH4Tze+zNBwNWQTA9ZZYrNbBNL2+AgVskOoADN5pNc8pXyTNmmqz55jq/l2bhjbp5mm3B49qPShDU6Ef+++Q2DxxxasgYXF+XbtWhwm85
a9rLwXQO1765qz5hRJG6J3tZ6SBSjplxmFTHYkyo8f1mB8lin8KPMgVVK2Tsm4T64ViTjsw==

ISAAC JUSTINE CANELA SÁNCHEZ | Fecha:2025-05-28 13:32:03 | FIRMANTE

Q9hbGWtNbVikkH47jZG9peeyW3aWRc04pc+XEdZV8sNgML05mpWWc3mJnVj9+3UOCFXJeauE3SiX4VsBYkUcaPKG/wkPNuoxeDZiPZITXzwxXVdqbyIoPdZo0LVtDf/g7weP
Mrx6KMPBGq/zkc4hPLYLJ+FujAHokdKUKYH9X1cO3D+kz/SalMEx3UQQx8efv3qqRyqd1YqXXNhIr+svakS3mz/fojZHokBhv0WK8r9Q5YCuwEYVq3rPyTNroOC6Tuj4rBIlt9Rtc3x
nLbVp2p+9hG2oHnPCdJoVNQzPUwJUd4DisbG7CJLnt2b4gnpjta0e9gjDIFpM/YPoK6lvUw==

JAVIER DELGADO GONZAGA | Fecha:2025-05-28 18:52:25 | FIRMANTE

XKNtIYpXxr1cBpzhp6xLF/jO9aMZ1TtLI2uQF4LMnh6VnBJH1RHCB0PrQIb/ZB1G2NVK1z14dCNsPa4iaRJwRLY4Tvs5HQNcrXBm0k1bMSd6xO7fjk//LrYXpg/XeV3865oKNBTW
MBc/iCQhDdcbw/ASE9LOS9EhUcjYJN4NDYz619fD8spMA9Le5gQMUq3cvvoLD51zVd09MrXNeFO+W1O/zBSBIEyeyHxsvFfuMIdXst9w46OryMIJ528GkEuqElug0TliApLC0bV+
Ksp6xOS1xdW8kHcZIiOroUwJNmd+soAW/p8LwBLxTJPTahhbvvznDRL0HIhmBjWu+dgSXQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

BdqSRvCZ6

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Vk2Yu7Cqy8k8LYHqLA8anLilzWuDj9zk