

INSTITUTO DE FÍSICA  
DE LA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

# Modelado de un destilador multietapa asistido mediante un módulo termoeléctrico

Tesis que para obtener el grado de:  
**Maestro en Ciencias (Física)**

*Presenta:*

Lic. en Física Jaime David Pérez Salazar

*Asesor:*

Dr. Yuri Nahmad Molinari

San Luis Potosí, S.L.P, México.

18 de Junio 2026

Modelado de un destilador multietapa asistido mediante un módulo termoeléctrico © 2026 by Jaime David Pérez Salazar is licensed under a CC BY-NC-SA 4.0

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Introducción . . . . .	5
<b>2. Fundamentos Teóricos</b>	<b>7</b>
2.1. Fundamentos termodinámicos . . . . .	7
2.2. Primera ley de la termodinámica . . . . .	8
2.3. Balances de energía y calor . . . . .	9
2.3.1. Balance en sistemas cerrados . . . . .	9
2.3.2. Balance de energía en superficies . . . . .	9
2.4. Mecanismos de transferencia de calor . . . . .	10
2.4.1. Conducción . . . . .	10
2.4.2. Conductividad térmica . . . . .	11
2.4.3. Convección . . . . .	11
2.4.4. Radiación . . . . .	11
2.5. Irradiancia . . . . .	12
2.6. Transferencia de masa . . . . .	13
2.6.1. Tasa de producción . . . . .	13
2.6.2. Mecanismos simultáneos de transferencia de calor . . . . .	13
2.7. Módulos Termoeléctricos (TEM) . . . . .	14
2.7.1. Efecto Joule . . . . .	14
2.7.2. Conducción térmica . . . . .	15
2.7.3. Efecto Seebeck . . . . .	15
2.7.4. Efecto Peltier . . . . .	15
2.7.5. Balances de energía del módulo termoeléctrico (o Peltier)	16
2.7.6. Coeficiente de rendimiento (COP) . . . . .	16

<b>3. Modelado y simulación</b>	<b>18</b>
3.1. Introducción . . . . .	18
3.2. Destilador de una etapa . . . . .	18
3.2.1. Consideraciones para hacer el modelado . . . . .	19
3.2.2. Balance de energía en la cara frontal . . . . .	21
3.2.3. Método de solución del modelo de transferencia de masa y energía para una etapa . . . . .	23
3.2.4. Desglose del algoritmo . . . . .	25
3.2.5. Validación del modelo de etapa unitaria . . . . .	27
3.3. Destilador solar multietapa . . . . .	30
3.3.1. Desglose del algoritmo . . . . .	31
3.3.2. Validación del modelo . . . . .	33
3.4. Acoplamiento TEM-Destilador . . . . .	37
3.4.1. Determinación de las propiedades del TEM . . . . .	37
3.4.2. Balance de calor . . . . .	38
3.4.3. Desglose del algoritmo . . . . .	39
3.4.4. Acoplamiento TEM-Fuente de calor . . . . .	41
3.4.5. Balance de calor . . . . .	42
3.4.6. Desglose del algoritmo . . . . .	42
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>44</b>
4.1. Introducción . . . . .	44
4.2. Análisis operativo del Peltier . . . . .	45
4.2.1. Análisis de la Tasa de Calor Rechazado ( $Q_E$ ) . . . . .	45
4.2.2. Análisis del Consumo de Potencia Eléctrica ( $q_W$ ) . . . . .	48
4.2.3. Análisis del Coeficiente de Desempeño (COP) y Estabilidad Operativa . . . . .	50
4.3. Conclusiones de Diseño . . . . .	52
4.4. Rendimiento . . . . .	54
4.4.1. Comparación entre con diferentes alturas del dispositivo . . . . .	54
4.4.2. Comparación con otros destiladores . . . . .	55
<b>A. Código Etapa Unitaria</b>	<b>58</b>
<b>B. Código Destilador <math>n</math> etapas</b>	<b>63</b>
<b>C. Código Fuente Térmica</b>	<b>68</b>

# Agradecimientos

Me gustaría comenzar mis agradecimientos con las personas más importantes en mi vida; mi familia. Desearía encontrar las palabras precisas para poder agradecer a mis padres, los señores Jaime y Mary, por todo el apoyo, el cariño y el amor que me han brindado de una y mil formas durante toda mi vida, pero no existen palabras tales; ellos son y serán el pilar de mi vida. Lo único que espero es que al verme, sepan que todo su amor es correspondido.

A mis hermanos Meñito y Gabo por su compañía y por la motivación que le brindan a mi vida con el simple hecho de estar presentes. A mis mascotas; a mi Pirinolo que llegó en el momento justo a mi vida.

A mi tía Leonor y a mi tío Reyes, por su apoyo.

A mi amigo Sergio por la manera tan buena que ha influenciado mi vida y por ser el ejemplo de persona que uno desearía ser.

A mis amigos Fer, Leo, Jan, Moni, Aracely, Carlos, Alberto, Diana, Isaac, Vic, y demás personas que, a pesar de la distancia, aprecio su presencia en mi vida.

A la JM que ha sido mi hogar durante tantos años.

Al Dr. Yuri por su asesoría, apoyo, orientación académica, consejos y sobre todo por la confianza depositada en mí a lo largo de la maestría.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIH-TI), por el vital financiamiento económico otorgado. Este apoyo institucional me brindó la tranquilidad y los recursos necesarios para poder dedicarme de tiempo completo a mis estudios de posgrado y al desarrollo de este proyecto.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

Según el informe del Instituto de la Universidad de las Naciones Unidas para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud (UNU-INWEH), ríos, lagos y acuíferos han sido llevados más allá de su punto de recuperación por décadas de sobreexplotación, contaminación, destrucción de ecosistemas y presión climática acumulada. Desde principios de la década de 1990, más del 50 % de los grandes lagos del planeta ha perdido volumen y el 70 % de los grandes acuíferos muestra tendencias de declive sostenido (UNU-INWEH, 2026; ONU-Agua).

Esta crisis tiene un impacto demográfico directo: más de 4,000 millones de personas sufren escasez grave de agua al menos un mes al año y, durante el período 2022-2023, 1,800 millones vivieron bajo condiciones de sequía extrema. Actualmente, cerca del 25 % de la población mundial padece un estrés hídrico extremo, cifra que se espera crezca en 1,000 millones para 2050. Además, la ONU proyecta que para 2030 el uso global del agua aumentará en un 40 % debido al cambio climático, la acción humana y el crecimiento demográfico. En contraste con esta escasez, en México el consumo promedio de agua potable por persona alcanza los 366 litros diarios, una cifra muy superior a la necesidad básica de 50 a 80 litros sugerida por la OMS.

El uso de destiladores solares surge como una alternativa accesible económicamente y amigable con el medioambiente para combatir la crisis hídrica global. Sin embargo, la eficiencia de los destiladores tradicionales resulta extremadamente baja. Es aquí cuando surge la idea del reciclaje de entalpía

que se refiere a la reutilización del calor liberado durante la condensación del agua en los destiladores solares multi-etapa. En el año 2020, *Zhang et al* [1], logra identificar que la geometría de los dispositivos es la principal limitante para la optimización de la eficiencia. Consiguieron alcanzar una eficiencia térmica de reutilización de calor cercana al 400 % (y una tasa de evaporación de  $5.78 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) superando por casi 200 % al trabajo de *Chiavazzo et al.* [2], además inspiraron trabajos de cogeneración de energía eléctrica y térmica como el grupo de *Bai et al.* [3] que acoplan una celda solar a un destilador, mejorando significativamente la eficiencia de dicha celda y obteniendo una tasa de destilado bastante competitiva ( $2.06 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Recientemente se ha impulsado el uso de módulos termoelectricos con el fin de generar gradientes de temperatura altos combinados con diferentes tecnologías para así aumentar la tasa de producción de agua destilada y la eficiencia térmica [4, 5], en dichos trabajos, los destiladores son de una sola etapa y el módulo Peltier se coloca en la cara del condensador y se usa como bomba para enfriar y mejorar el transporte de calor.

En el contexto del desarrollo de nuevas tecnologías para la desalinización y purificación de agua, Kim et al. [6] presentan una revisión sobre los avances recientes en la evaporación interfacial impulsada por energía solar. En su investigación, los autores elaboran un análisis de los métodos actuales de destilación, contrastando el uso de diversas tecnologías, arquitecturas y estrategias de gestión térmica. A través de una comparativa detallada, el estudio evalúa el estado del arte de múltiples dispositivos en función de parámetros clave como su tasa de producción, eficiencia de conversión energética y viabilidad económica. Este trabajo establece un marco de referencia fundamental para comprender las limitaciones y alcances de las tecnologías actuales, permitiendo situar de manera objetiva el rendimiento y las ventajas termodinámicas de nuevas propuestas, como aquellas que integran bombeo de calor o destilación en múltiples etapas. El presente trabajo propone un modelo teórico desarrollado en python de un destilador eléctrico con alta eficiencia térmica de recuperación de calor y un consumo eléctrico de operación competitivo además de una tasa de evaporación ajustable, impulsado por el uso de un módulo Peltier como bomba de calor altamente eficiente.

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

### 2.1. Fundamentos termodinámicos

La energía existe en una gran variedad de formas: térmica, eléctrica, cinemática, magnética, mecánica, potencial, química, etc. y su suma constituye la *energía total* del sistema,  $E$ . Los tipos de energía relacionados con la estructura molecular de un sistema y con el grado de la actividad molecular se conoce como energía microscópica. La suma de todas las formas microscópicas de energía se llama *energía interna* de un sistema y se denota por  $U$  [7].

Es posible transferir energía hacia una masa dada, o desde esta, mediante dos tipos de mecanismos: trabajo y calor. Si la fuerza que impulsa una interacción energética es una diferencia de temperatura, entonces se dice que dicha interacción es la transferencia de calor. En caso contrario, es trabajo. Se le llama *razón de transferencia de calor* a la cantidad de calor que se transfiere por unidad de tiempo, denotada por  $q$ .

La velocidad a la que se transfiere el calor tiene unidades de  $\text{Js}^{-1}$ , es decir, *Watts*. El calor es la forma de transferencia de energía de un sistema a otro como resultado de la existencia de una diferencia de temperatura. En los análisis termodinámicos nos hallamos interesados en la *cantidad* de calor que se transfiere desde un sistema a otro.

El calor se puede transferir desde un sistema hacia otro mediante tres métodos diferentes: *convección, conducción, y radiación*. Todas las formas de transferencia de energía requieren de una diferencia de temperatura y la dirección de la transferencia va desde el medio que se encuentra a una mayor

temperatura hacia el medio de menor temperatura.

La razón de calor transferido por unidad de área perpendicular a la dirección de la transferencia se le llama *flujo de calor*:

$$Q = \frac{q}{A} \quad (2.1)$$

donde A representa el área de transferencia de calor.

## 2.2. Primera ley de la termodinámica

Durante un proceso, no podemos crear o destruir energía, únicamente podemos cambiar una forma de energía por otra.

Se puede expresar el balance de energía en un sistema que atraviesa un proceso determinado (en *joules*) mediante

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sist} \quad (2.2)$$

Donde  $E_{ent}$  es la energía total que entra al sistema,  $E_{sal}$  es la energía total que sale del sistema y  $\Delta E_{sist}$  es el cambio neto total en la energía total del sistema.

También podemos expresar este cambio en *forma de razones* (en *Watts*):

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{sist}}{dt} \quad (2.3)$$

La energía es una propiedad esencial de la materia y la magnitud de una propiedad no cambia mientras no se modifique el estado del sistema. Si el estado de cierto sistema no cambia durante un proceso, es decir, si  $\Delta E_{sist} = 0$ , se dice que el proceso es un *proceso estacionario*. Podemos representar un estado estacionario (como *razones de transferencia (es decir, en Watts)*) de la siguiente manera:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sal} \quad (2.4)$$

Si no existen efectos significativos eléctricos, magnéticos, de movimiento, gravitatorios, etc., el cambio de energía total en un sistema durante un proceso se puede representar por el cambio en su energía interna;  $\Delta E_{sist} = \Delta U_{sist}$

## 2.3. Balances de energía y calor

Al analizar balances de energía, nos suele interesar el proceso de transferencia de calor. Entonces es conveniente expresar las diferentes formas de energía como generación de calor.

$$q_{ent} - q_{sal} + E_{gen} = \Delta E_{t\acute{e}rmica,sistema} \quad (2.5)$$

donde  $q_{ent} - q_{sal}$  representa el calor neto transferido,  $E_{gen}$  es la generación de calor y  $\Delta E_{t\acute{e}rmica,sist}$  corresponde al cambio en la energía térmica del sistema.

### 2.3.1. Balance en sistemas cerrados

En el caso de los sistemas cerrados la masa no cambia por lo que constan de una *masa fija*. Para el caso especial de *sistemas cerrados estacionarios* no existen cambios en su velocidad o elevación durante un proceso podemos ver el balance de energía como:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta U = mc_v \Delta T \quad (2.6)$$

donde el cambio en la energía interna se encuentra en términos de la masa  $m$ , la capacidad calorífica a volumen constante  $c_v$  y el cambio en la temperatura.

### 2.3.2. Balance de energía en superficies

Como ya se comentó, el calor se transfiere mediante diferentes mecanismos: *convección, conducción y radiación*. Y se transfiere de un medio a otro mediante distintas vías.

Una superficie no posee ni volumen ni masa, por lo tanto, tampoco energía. Para hacer un balance de energía, es necesario modelar la superficie como un ente ficticio en el cual el contenido de energía permanece constante durante todo el proceso, es decir, como un proceso estacionario:

$$E_{ent} = E_{sal} \quad (2.7)$$

Esta relación es válida para condiciones estacionarias y transitorias, podemos expresar el balance de energía para la superficie exterior como:

$$q_1 = q_2 + q_3 \quad (2.8)$$

Si se desconoce en qué dirección se efectúan las interacciones es posible suponer que todas van hacia la superficie  $\Sigma E_{ent} = 0$ . Se observa que al final, las interacciones en la dirección opuesta terminarán con un signo negativo.

## 2.4. Mecanismos de transferencia de calor

El calor es la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperaturas. Cuando nos interesa hacer un análisis termodinámico de un proceso, nos interesamos por las cantidades de calor transferidas conforme un sistema pasa de un estado estacionario a otro estado de equilibrio. Es necesario precisar que todos los modos de transferencia de calor requieren de que exista una diferencia de temperaturas y la dirección de la transferencia es del medio de mayor temperatura al medio de menor temperatura.

### 2.4.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de partículas de mayor energía hacia partículas adyacentes de menor energía como resultado de una interacción. La conducción es propia de sólidos, líquidos y gases. En gases y líquidos se debe principalmente a colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En sólidos es una combinación entre vibraciones y transferencia de electrones.

La transferencia de calor por conducción se rige por *la ley de Fourier de la conducción*, enunciada por primera vez en 1822 por J. Fourier:

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.9)$$

En esta ecuación,  $k$  representa la conductividad térmica del material (que funciona como constante de proporcionalidad),  $A$  es el área transversal por donde cruza el calor, y  $\frac{dT}{dx}$  nos da el gradiente térmico. En términos más simples, esta regla nos indica que la cantidad de calor que fluye en una dirección específica es directamente proporcional al cambio de temperatura en ese mismo eje.

### 2.4.2. Conductividad térmica

En el estudio del transporte térmico,  $k$  representa la capacidad de un material para conducir calor. Formalmente, este parámetro mide la tasa de transferencia de energía térmica por unidad de área y de longitud cuando el medio está sujeto a una diferencia de temperatura. Puede entenderse como la capacidad que posee un material para conducir calor. En los análisis de transferencia de calor se suele suponer que el material tiene propiedades uniformes en cualquier dirección, es decir, es isotrópico.

### 2.4.3. Convección

La convección térmica es un proceso que ocurre al combinarse la conducción con el movimiento de un fluido. En la práctica, es el calor que viaja arrastrado por un líquido o gas en movimiento, o bien, el intercambio térmico que se da entre un objeto sólido y el fluido que corre a su alrededor. Este fenómeno se calcula usando la *ley de enfriamiento de Newton*:

$$q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

El coeficiente  $h$  es un parámetro que se determina experimentalmente y su valor depende de factores que intervienen en la convección tales como la geometría de la superficie, el movimiento del fluido, sus propiedades o la velocidad de este, por lo que  $h$  no es una propiedad del fluido. Se le llama coeficiente de transferencia de calor por convección.

### 2.4.4. Radiación

La radiación es un tipo de energía que emite la materia en forma de ondas electromagnéticas. No necesita de un medio para propagarse y puede viajar a través del vacío.

En los análisis de transferencia de calor nos interesa la radiación que emiten los cuerpos debido a su temperatura, llamada *radiación térmica*. Todos los cuerpos que tienen una temperatura mayor al cero absoluto emiten radiación térmica.

La ley de *Stefan-Boltzmann* describe el valor máximo de radiación que emite una superficie que se encuentra a temperatura  $T_s$ :

$$q_{emitida,máx} = \sigma A_s T_s^4 \quad (2.11)$$

donde  $\sigma$  es la constante de *Stefann-Boltzmann*.

Si una superficie de área  $A_s$ , emisividad  $\epsilon$  y temperatura  $T_s$  se encuentra encerrada por otra superficie mucho más grande a temperatura  $T_{alred}$ , la transferencia neta de calor (siempre y cuando el gas que las separa no participe en la radiación) se expresa de la siguiente manera:

$$q_{rad} = \epsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (2.12)$$

Corresponde a un caso especial en el cual la emisividad y el área superficial de la superficie que encierra a la otra no tienen efecto sobre la transferencia neta del calor por radiación.

La definición del *coeficiente combinado de transferencia de calor*,  $h_{combinado}$  nos ayuda a describir en algunas ocasiones de una manera más conveniente los fenómenos de transferencia de calor por radiación cuando la superficie está rodeada por un gas como el aire. Dedicado que la transferencia por radiación sucede de manera paralela a la conducción o convección entre la superficie y el gas.

$$q_{total} = h_{combinado}A_s(T_s - T_\infty) \quad (2.13)$$

En esencia,  $h_{combinado}$ , es un coeficiente de transferencia de calor por convección modificado que incluye los efectos de la radiación.

## 2.5. Irradiancia

La *irradiancia* es la tasa a la cual la energía radiante incide en la superficie terrestre por unidad de tiempo por unidad de área ( $\text{W m}^{-2}$ ). La irradiancia solar que llega a la tierra depende de diferentes factores como el ángulo de incidencia solar, la hora del día, la época del año o la distancia respecto a la atmósfera. Además de que la mayor parte de la energía se encuentra en un rango de longitud de onda entre 0.4 y 2.5  $\mu\text{m}$  lo cual es importante al momento de seleccionar colectores solares.

El *espectro estándar terrestre* es la norma con la cual se evalúa la energía solar incidente. Normalmente regulado por la *masa de aire* atmosférico (AM) y el *ángulo cenital del sol*, definidos por la norma ASTM G-173-03 [8]. La irradiancia adoptada como el estándar es la *AM1.5*, que incluye la radiación directa, dispersa y reflejada por el suelo, y corresponde a una superficie inclinada un ángulo de  $48^\circ$  hacia el ecuador. Posee un valor aproximado de  $G_{AM1.5}=1000\text{W m}^{-2}$ .

## 2.6. Transferencia de masa

Un medio "inestable" compuesto por dos o más especies, naturalmente tiende a buscar "estabilidad" buscando un balance entre sus partes. Dicha tendencia usualmente se conoce como fuerza motora, que es el mecanismo mediante el cual ocurren los fenómenos de transporte. Si hablamos en términos de *concentración*, es posible pensar esta búsqueda de estabilidad como un proceso de difusión, donde el flujo siempre va en dirección de mayor a menor concentración. Cuya tasa es proporcional al gradiente de concentraciones en una cierta dirección y al área normal a la dirección del flujo.

Análogamente a la *Ley de Conducción de Fourier*, podemos describir la tasa de difusión de masa entre las especies químicas A y B, mediante la *Ley de Difusión de Fick*, en la base de masas ( $\text{kg m}^{-2}$ ):

$$J_A = -\rho D_{AB} \frac{dc_A}{dx} \quad (2.14)$$

donde  $D_{AB}$  es el coeficiente de difusión de las especies en la mezcla,  $\rho$  es la densidad de la mezcla y  $c_A$  es la concentración de las especies en esa ubicación.

### 2.6.1. Tasa de producción

La tasa de producción de agua destilada se puede estimar mediante el principio de conservación de la masa. Toda el agua que se evaporó en la placa  $i$ , se condensará en la placa  $i + 1$  (condensador):

$$\dot{m}_{\text{agua}} \approx J_A \times A_{\text{efectiva}} \quad (2.15)$$

donde el  $A_{\text{efectiva}}$  es el área del condensador.

### 2.6.2. Mecanismos simultáneos de transferencia de calor

Existen tres mecanismos de transferencia de calor: *convección*, *conducción* y *radiación*, pero no pueden existir los tres simultáneamente en un medio.

A través de un *fluido* se da la transferencia de calor por *conducción* o *convección*, pero no ambas simultáneamente. Los gases son casi invisibles a la radiación, a excepción de algunos casos específicos que se sabe absorben

gran parte de la radiación a ciertas longitudes de onda. En la mayoría de los casos, un gas que se encuentra entre dos superficies sólidas no interfiere en la radiación y sirve como un tipo de vacío. Los líquidos suelen absorber fuertemente la radiación. Por último, a través del vacío solo puede ocurrir la transferencia por *radiación*, puesto que la *convección* y *radiación* requiere la presencia de un medio material.

## 2.7. Módulos Termoeléctricos (TEM)

Los módulos termoeléctricos son dispositivos que consisten en un conjunto de  $N$  pares de patas (pellets), fabricadas con materiales semiconductores diferentes (una pata de un material tipo p y la otra de un material tipo n). Son conectadas térmicamente en su base mediante uniones de cobre (o algún material conductor) que a su vez son unidas mediante una placa de cerámica. Los semiconductores en el TEM son conectados térmicamente en paralelo mientras que eléctricamente se encuentran en serie.

Típicamente estos módulos son usados como generadores termoeléctricos (TEG) o como bombas de calor, ya sea para enfriar o para calentar componentes. El funcionamiento y uso de los módulos termoeléctricos (TEM) está basado en cinco fenómenos físicos: los efectos Joule, Seebeck, Thomson y Peltier y la conducción térmica. Normalmente el efecto Thomson (que es proporcional a los cambios en el coeficiente de Seebeck con la temperatura  $d\alpha/dT$ ) es despreciable [9, 10].

### 2.7.1. Efecto Joule

Es el calor residual que se produce cuando circula una corriente por un material conductor: Al moverse por un material, los electrones se topan con cierta resistencia y experimentan constantes colisiones. Durante estos choques, le entregan su energía cinética a la red del material, y esa energía sobrante se disipa térmicamente:

$$q_J = I^2 R \tag{2.16}$$

donde  $q_J$  es la energía en forma de calor producida por la corriente,  $I$  es la intensidad de la corriente que circula,  $R$  es la resistencia eléctrica del conductor.

### 2.7.2. Conducción térmica

El calor llevado por conducción a través del módulo, puede describirse mediante la ecuación de conducción de Fourier [11]:

$$q_F = \frac{\Delta T}{\theta} = \kappa \Delta T, \quad (2.17)$$

donde  $\theta$  es la resistencia térmica del material,  $\kappa = 1/\theta$  es la conducción térmica del material.

### 2.7.3. Efecto Seebeck

El efecto Seebeck es un fenómeno termoelectrico que se observa cuando en un circuito formado por la unión de dos metales semiconductores distintos que se encuentran a diferentes temperaturas, convierten esta diferencia de temperatura en voltaje eléctrico, lo que provoca que los electrones o huecos presentes en el material se muevan y generen una diferencia de potencial.

El potencial eléctrico de la unión puede describirse mediante el coeficiente de Seebeck  $\alpha$  y es conocido como coeficiente peltier:

$$\pi = \alpha T \quad (2.18)$$

el coeficiente  $\alpha$  depende completamente de la unión y del par de semiconductores que se use. La fuerza electromotriz del TEM es, entonces:

$$U = \alpha \Delta T \quad (2.19)$$

### 2.7.4. Efecto Peltier

El efecto Peltier se caracteriza por la diferencia de temperaturas que se produce en la unión de dos semiconductores cuando se les hace circular una corriente. Uno de los dos metales absorbe calor y el otro emite dependiendo de la dirección de la corriente. La cantidad de calor emitida o absorbida es proporcional a la corriente  $I$  que se aplica al TEM y al coeficiente Peltier :

$$q_P = \alpha IT \quad (2.20)$$

### 2.7.5. Balances de energía del módulo termoelectrico (o Peltier)

En la literatura suelen nombrarse las caras del Peltier como lado caliente y lado frío, sin embargo, para ser más precisos las llamaremos cara que absorbe (o disipa) calor ( $Q_A$ ), cara que emite (o rechaza) el calor ( $Q_E$ ) y potencia eléctrica suministrada al módulo ( $Q_W$ ). Están dados (en Watts) por las ecuaciones:

$$q_A = \underbrace{\alpha IT_A}_{\text{Peltier } (q_P)} - \underbrace{\frac{1}{2} I^2 R}_{\text{Joule } (q_J)} - \underbrace{K(T_E - T_A)}_{\text{Conducción } (q_F)} \quad (2.21)$$

$$q_E = \underbrace{\alpha IT_E}_{\text{Peltier } (q_P)} + \underbrace{\frac{1}{2} I^2 R}_{\text{Joule } (q_J)} - \underbrace{K(T_E - T_A)}_{\text{Conducción } (q_F)} \quad (2.22)$$

$$q_W = \underbrace{\alpha I(T_E - T_A)}_{\text{Potencia Peltier}} + \underbrace{I^2 R}_{\text{Potencia interna del módulo}} \quad (2.23)$$

b

donde:

$T_A$ : Temperatura de la cara por donde se absorbe el calor.

$T_E$ : Temperatura de la cara por donde se emite el calor.

$q_A$ : Calor que llega al lado frío del módulo.

$q_E$ : Calor que llega al lado caliente del módulo.

$\alpha$ : coeficiente de Seebeck total del módulo.

$I$ : corriente eléctrica que se le suministra al módulo.

$R$ : resistencia eléctrica total del módulo.

$\theta$ : resistencia térmica del módulo.

El calor que se debe de emplear para un bombeo efectivo ( $q_E$ ), por conservación de la energía es:  $q_W = q_E - q_A$ . Es decir, la potencia de entrada del módulo TEM debe de vencer los efectos Seebeck y Joule.

### 2.7.6. Coeficiente de rendimiento (COP)

El rendimiento del módulo como bomba de calor, puede definirse como el cociente entre el calor emitido y la potencia de eléctrica de entrada del módulo:

$$COP = \frac{q_E}{q_W}. \quad (2.24)$$

La manera más eficiente de utilizar un módulo Peltier se halla cuando el COP es máximo.

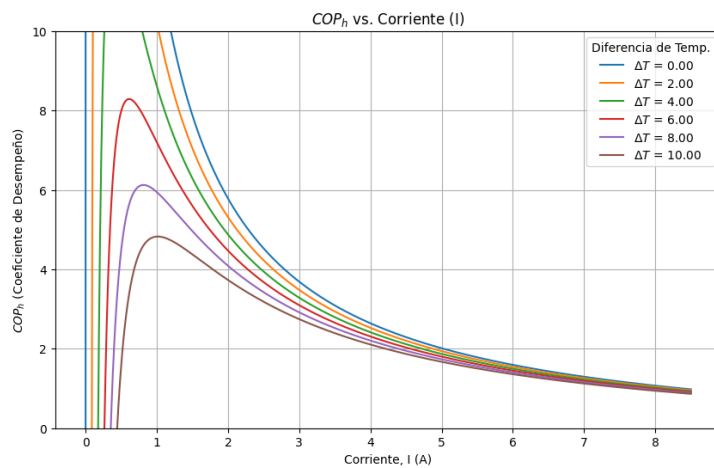


Figura 2.1: Rendimiento de un módulo termoeléctrico comercial

Es necesario ser precisos con el hecho de que el COP que se observa en la figura (2.1) es un rendimiento ideal, es decir, es el coeficiente máximo que podría ofrecer el módulo para una diferencia de temperaturas dada.

# Capítulo 3

## Modelado y simulación

### 3.1. Introducción

Una vez establecidos los fenómenos de transferencia de calor y masa y las expresiones matemáticas de la física del módulo Peltier en el capítulo anterior, el presente capítulo detalla el desarrollo de los balances de energía y masa para el modelado numérico del sistema. El modelo se expone de la siguiente manera: se inicia con el modelo para un destilador de una sola etapa, para luego expandirse a un destilador multietapa, y concluye con el desarrollo matemático del acoplamiento entre el módulo termoelectrico (TEM), el destilador y la fuente de calor. Se presentan los diagramas de flujo y se explican los puntos clave de los algoritmos implementados en Python para cada escenario. Finalmente, se expone la verificación y validación del modelo computacional comparando los resultados obtenidos con la literatura reciente, asegurando la fiabilidad numérica del dispositivo propuesto.

### 3.2. Destilador de una etapa

Los balances de energía, las ecuaciones y las consideraciones estacionarias para realizar el modelo numérico del destilador se realizaron siguiendo el ejemplo de *Zhang et. al* [1].

Se modela un dispositivo de 1 etapa, altura  $a$  y separación interfacial  $b$ . En la Figura 3.1 se muestra el esquema de transferencia de calor así como la disposición del absorbedor solar, la mecha capilar, el evaporador y el condensador.

### 3.2.1. Consideraciones para hacer el modelado

1. El dispositivo opera en estado estacionario.
2. La mecha capilar es capaz de proveer suficiente agua al evaporador y no se produce condensación, ya que el flujo de calor es pequeño, menor al orden de un sol ( $\sim 1000 \text{ W m}^{-2}$ ).
3. Las paredes internas que separan etapas vecinas son muy delgadas, impermeables y presentan una alta conductividad térmica. La resistencia térmica proporcionada por la mecha capilar y la placa es despreciable. La resistencia térmica está dominada por el aire en el espacio entre etapas:
  - La separación interna consiste de una mecha capilar y una placa de algún metal o semiconductor cuya conductividad térmica ronda  $\sim 10 - 300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , ambos de un grosor de  $\sim 1 \text{ mm}$ . Debido a que la mecha capilar estará llena de agua, su conductividad térmica estará determinada principalmente por las propiedades del agua.
  - $R_{conductor} = \delta_{conductor} / \kappa_{conductor} \approx 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$
  - $R_{mecha} = \delta_{mecha} / \kappa_{mecha} \approx 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$
  - La resistencia en el espacio de aire está dada por :
    - $R_{separacion} = b / \kappa_{aire} \approx 0,3 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$
4. No existe transferencia de calor por convección entre etapas debido a que la separación entre etapas es muy pequeña  $\approx 1 \text{ cm}$ .
5. Se desprecian las transferencias radiativas de calor entre etapas intermedias. La diferencia de temperaturas entre etapas es muy pequeña; en la simulación, la temperatura de los primeros dos evaporadores se encuentra entre  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $76 \text{ }^\circ\text{C}$ , las pérdidas radiativas al ambiente son de aproximadamente  $Q_{rad} \approx 13 \text{ W m}^{-2}$  que representa el 1.5% del calor total de entrada ( $1000 \text{ W m}^{-2}$ ), y dado que la diferencia de temperatura en etapas posteriores es menor, despreciar la transferencia de radiación interna es una suposición coherente.

6. No existe transporte convectivo de masa debido a que la separación entre etapas (b) es muy pequeña y para la formación de corrientes convectivas se requiere que el número de Rayleigh supere un valor crítico ( $Ra_c \approx 1708$ ), ya que  $Ra \propto 1/b^3$  garantiza  $Ra < Ra_c$ .
7. Por lo anterior, el transporte de vapor depende de la difusión la cual es movida por los gradientes de concentración (presión de vapor), cuyas propiedades, debido a su baja salinidad (35g/l) pueden ser determinadas por las propiedades del agua pura:
  - La diferencia de presión de vapor entre la placa de evaporación y la placa de condensación se puede estimar mediante la *Ley de Raoult*:

$$\Delta p_\nu = a(x_{evaporador})p_\nu(T_{evaporador}) - a(x_{condensador})p_\nu(T_{condensador})$$

donde  $a$  es la actividad de la solución que es una función de la fracción de masa de la sal en la solución.  $x_{evaporador} = 0,035$  para agua de mar y  $x_{condensador} = 0$  para agua destilada. El valor de  $a$  puede ser estimado como:

$$a(x) = \frac{M_{NaCl}(1-x)}{M_{NaCl}(1-x) + N_{ion}M_{H_2O}x}$$

donde  $N_{ion} = 2$  para el cloruro de sodio.  $M_{H_2O}$  y  $M_{NaCl}$  son las masas molares del sodio y del cloro. Sustituyendo estos valores se encuentra que  $a(x_{evaporador}) = 0,98$  y  $a(x_{condensador}) = 1$ , indicando que el transporte de vapor debido a la presencia de sal acuosa en la solución es aproximadamente la misma que la determinada por las propiedades del agua pura.

8. El transporte unidimensional es dominante, ya que las pérdidas laterales son despreciables y la razón entre el largo del dispositivo y la separación entre etapas es muy grande.
9. El dispositivo está sellado y no presenta pérdidas de vapor ni de líquido.

La temperatura ambiente  $T_{ambiente}$  se mantiene constante, al igual que  $T_b = T_{ambiente}$  debido a que el condensador se mantiene inmerso en la salmuera que se encuentra a temperatura ambiente.

### 3.2.2. Balance de energía en la cara frontal

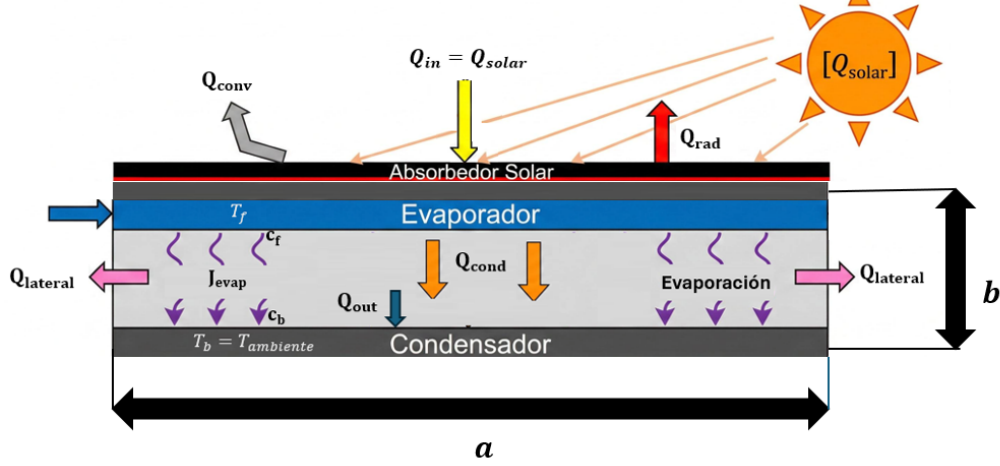


Figura 3.1: Destilador solar de una etapa

El balance de energía en la cara frontal está dados por:

$$q_{in} = a^2 Q_{solar} = a^2 (Q_{radiación} + Q_{convección} + Q_{evaporación} + Q_{conducción}), \quad (3.1)$$

donde  $Q_{solar}$  representa el flujo de calor solar típico ( $AM1,5$ ):

$$Q_{solar} = 1000 \text{ Wm}^{-2}. \quad (3.2)$$

Las pérdidas en el absorbedor solar  $Q_{radiación}$  y  $Q_{convección}$ , que representan respectivamente las pérdidas por radiación y por convección hacia el ambiente:

$$Q_{radiación} = \epsilon \sigma (T_{evaporador}^4 - T_{ambiente}^4), \quad (3.3)$$

donde  $T_{absorbedor} = T_{condensador}$  y  $\epsilon$  representa la emisividad del absorbedor solar,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  es la constante de Stefann-Boltzmann y

$$Q_{convección} = h_a (T_{evaporador} - T_{ambiente}) \quad (3.4)$$

$h_a$  es el coeficiente de convección del aire. Partiendo de la suposición 5, el gradiente de temperatura en la dirección  $x$  es mucho más grande que en las direcciones  $y$  y  $z$ , podemos aproximar el calor llevado por conducción mediante la ley de conducción de Fourier unidimensional:

$$Q_{conducción} = -k \frac{dT}{dx} \approx k \frac{T_{evaporador} - T_{condensador}}{b}. \quad (3.5)$$

El calor recuperado por la evaporación puede escribirse a partir del flujo másico de evaporación ( $J_{\text{evaporación}}$ ) como:

$$Q_{\text{evaporación}} = M_{\text{agua}} h_{\text{agua}} J_{\text{evaporación}} \quad (3.6)$$

donde  $M_{\text{agua}}$  es el peso molecular del agua,  $h_{\text{agua}}$  representa el calor latente de vaporización del agua. El transporte de vapor puede aproximarse usando la Ley de Fick unidimensional:

$$J_{\text{evaporación}} = -D_a \frac{dc}{dx} \approx D_a \frac{c_{\text{evaporador}} - c_{\text{condensador}}}{b} \quad (3.7)$$

Donde  $c$  representa la concentración de vapor saturado del agua (en  $\text{kg m}^{-3}$ , la cual depende de la temperatura  $c = c(T)$  y  $D_a$  es la difusividad del vapor de agua.

Las pérdidas en las paredes laterales están dadas por:

$$Q_{\text{laterales}} = \frac{T_{\text{med}} - T_{\text{ambiente}}}{R_{\text{lateral}}}. \quad (3.8)$$

La temperatura media está dada por  $T_{\text{med}} = (T_{\text{evaporador}} - T_{\text{condensador}})/2$ . La resistencia térmica en las paredes laterales es la suma de la resistencia térmica que ofrece el aislante más la resistencia convectiva hacia el ambiente:

$$R_{\text{lateral}} = \frac{1}{h_a} + \frac{t}{k} \quad (3.9)$$

$t$  es el grosor del aislante,  $k$  es la conductividad térmica del aislante y  $h_a$  es el coeficiente de convección de aire. Para aire quieto  $h_a = 5.37$  [12].

El calor de salida en la etapa unitaria se expresa como:

$$q_{\text{out}} = a^2(Q_{\text{evaporación}} + Q_{\text{conducción}}) - (4ab)Q_{\text{laterales}}. \quad (3.10)$$

El flujo neto de calor, es decir, el calor que es potencialmente reutilizable es:

$$Q_{\text{neto}} = \frac{q_{\text{out}} - a^2 Q_{\text{conducción}}}{a^2}. \quad (3.11)$$

Con el propósito de evaluar el rendimiento del destilador se definen dos eficiencias:

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{a^2 Q_{\text{neto}} + (4ab)Q_{\text{lateral}}}{a^2 Q_{\text{solar}}}, \quad (3.12)$$

que estima cuánto del calor de entrada (en este caso  $Q_{solar}$ ) se convirtió en calor para evaporar.

En adición, definimos:

$$\eta_{rec} = \frac{Q_{neto}}{Q_{solar}}, \quad (3.13)$$

que nos indica la capacidad del destilador para reciclar el calor de condensación.

### 3.2.3. Método de solución del modelo de transferencia de masa y energía para una etapa

El método de solución empleado es un método iterativo (tipo disparo), donde se imponen condiciones de frontera, se propone una solución razonable y se itera con un factor de relajación hasta alcanzar convergencia.

Si observamos las ecuaciones (3.3) a (3.8) notamos que la variable que domina la física es la temperatura en la pared frontal, que llamaremos  $T_f$  y es desconocida, por lo tanto, es nuestra variable a encontrar. q ue está sujeta al balance:

$$Q(T_f) = Q_{rad}(T_f) + Q_{conv}(T_f) + Q_{evap}(T_f) + Q_{cond}(T_f) - Q_{solar} = 0 \quad (3.14)$$

donde  $Q_{solar}$  es una constante y una de las condiciones de frontera.

La concentración de vapor saturado  $c(T)$  en la fórmula (3.7), depende de la temperatura en la pared frontal ( $T_f$ ) y de la temperatura en la pared trasera, que llamaremos  $T_t$ . Dado que  $T_t$  se mantiene siempre a temperatura ambiente, por lo tanto, es constante y otra condición de frontera.

Ahora, la dificultad radica en encontrar  $T_f$ , a partir de la concentración de vapor saturado  $c(T)$ . Usualmente se determina a partir de fórmulas empíricas. En este trabajo se usó la ecuación de Antoine.

$$\log P_{sat}(T) = A - \frac{B}{T + C}, \quad (3.15)$$

A, B y C son constantes determinadas empíricamente para el agua en un rango entre 0 y 100 °C,  $P_{sat}$  es la presión de saturación y T es la temperatura en °C. Típicamente  $P_{sat}$  está en *mmHg*.

Podemos tratar el vapor de agua como un gas ideal partiendo de que:

1. El destilador opera a bajas presiones  $\approx 1$  atm.

2. El destilador opera en un rango de temperaturas entre  $20 \sim 80$  °C, un rango de temperaturas aceptable para mantener el vapor lo suficientemente lejos del punto crítico del agua.
3. El factor de compresibilidad  $Z = \frac{PV}{RT}$  que nos indica qué tanto se desvía el comportamiento de un gas del comportamiento de un gas ideal ( $Z = 1$ ). Para el agua en este rango de valores  $Z$  es aproximadamente 1.

Despejando para  $P_{sat}$  de la ecuación (3.15):

$$P_{sat,mmHg} = 10^{A - \frac{B}{T_C + C}}$$

Donde  $T_C$  indica que la temperatura está en grados celsius.

De la ecuación de gases ideales:

$$PV = nRT_K$$

Aquí  $T_K$  indica que la temperatura está en Kelvin. Usualmente la concentración de vapor saturado se expresa en  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ :

$$c(T) = \frac{n}{V} = \frac{P_{sat}}{RT_K},$$

la constante de los gases es  $R = 8,301 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Es importante mencionar que  $P_{sat}$  debe de estar en Pascales, por lo tanto hay que añadir un factor de conversión para convertir a  $Pa$ :

$$P_{sat,Pa} = 133,32 \cdot 10^{A - \frac{B}{T_C + C}}$$

Explícitamente  $c(T)$  se ve así:

$$c(T_C) = \frac{133,32 \cdot 10^{A - \frac{B}{T_C + C}}}{R \cdot (T_C + 273,15)}. \quad (3.16)$$

Si se quisiera expresar en  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  bastaría con multiplicar  $c(T)$  por el peso molecular del agua.

Como se puede observar no se puede encontrar directamente  $T_C$  despejando de la ecuación (3.16).

Para hacer el cálculo de  $T_C$ , se pueden tomar valores de alguna tabla de concentración de vapor saturado del agua como puede ser el libro de *Cengel* [7] y hacer una interpolación. También se puede hacer una interpolación

directamente de la ecuación (3.16). En el presente trabajo se optó por calcular algunos valores de  $c(T)$  y mediante la función *interp1d* en Python se hizo la interpolación. Para el cálculo de la temperatura correspondiente a cierta  $c$ , la función de interpolación recibe como entrada  $c(T_C)$  y devuelve la  $T_C$  correspondiente.

Combinando las ecuaciones (3.6) y (3.7):

$$c_f(T_f) = Q_{evap} \frac{b}{h_{agua} M_{agua} D_a} + c_t(T_t). \quad (3.17)$$

### 3.2.4. Desglose del algoritmo

El método de solución numérico empleado es un algoritmo iterativo de sustitución sucesiva. El proceso inicia con una suposición de valor inicial (semilla) para  $T_f$ . A partir de esta temperatura, se evalúan las pérdidas térmicas mediante las Ecuaciones (3.3), (3.4), (3.5) y (3.8), lo que permite resolver el balance de energía establecido en la Ecuación (3.14). Posteriormente, se actualiza la Ecuación (3.6) y se recalcula  $T_f$  mediante la Ecuación (3.17). Este ciclo se repite hasta satisfacer el criterio de convergencia  $|T_f^{(k)} - T_f^{(k-1)}| < \delta$ , donde  $\delta$  es la tolerancia permitida y los superíndices  $k$  y  $k - 1$  denotan la iteración actual y la previa, respectivamente. El diagrama de flujo de este algoritmo se detalla en la Figura 3.13, y las constantes utilizadas se listan en la Tabla 3.1.

Para establecer la estimación inicial de  $T_f$ , se asume que todo el flujo de calor incidente en la etapa se transforma en calor latente de evaporación:

$$Q_{evap}(T_f) = Q_{solar}$$

Con esta suposición, se obtiene una primera aproximación de  $T_f$  mediante la Ecuación (3.17). A partir de este valor, se evalúan las pérdidas térmicas  $Q_{rad}(T_f)$ ,  $Q_{conv}(T_f)$  y  $Q_{cond}(T_f)$  utilizando las Ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5) respectivamente. De la misma manera, las pérdidas laterales  $Q_{lat}$  se determinan con la Ecuación (3.8).

Posteriormente, se actualiza el término de evaporación despejándolo directamente del balance general establecido en la Ecuación (3.1):

$$Q_{evap}(T_f) = Q_{solar} - Q_{rad}(T_f) - Q_{conv}(T_f) - Q_{cond}(T_f)$$

Utilizando nuevamente la Ecuación (3.17), se recalcula  $T_f$  y el resultado se compara con la estimación previa. Este proceso de sustitución iterativa se repite hasta que se satisfaga la condición de convergencia:

$$|T_f^{(k)} - T_f^{(k-1)}| < \delta \quad (3.18)$$

donde  $\delta$  representa una tolerancia de  $0,01^\circ\text{C}$ , y los superíndices  $k$  y  $k - 1$  denotan la iteración actual y la anterior, respectivamente.

Constante	Valor	Unidades	Descripción
$Q_{solar}$	1000	$\text{W m}^{-2}$	Flujo solar incidente
$T_t$	20	$^\circ\text{C}$	Temperatura de la tapa trasera
a	5	cm	Altura del dispositivo
b	0-5	cm	Separación entre etapas
$D_a$	$3 \times 10^{-5}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Difusividad del vapor de agua
$h_a$	3.7	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	Coficiente de transferencia de calor por convección en el interior del dispositivo
$h_{side}$	10	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	Coficiente de transferencia de calor por convección en las paredes laterales
$k_a$	0.026	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Conductividad térmica del aire
t	0.01	cm	Grosor del aislante
k	0.05	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Conductividad térmica del aislante
$\epsilon$	0.03		Emisividad del absorbedor solar
$\sigma$	$5,67 \times 10^{-8}$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	Constante de Stefann-Boltzman
$h_{agua}$	2357	kJ	Calor latente de vaporización del agua
$M_{agua}$	0.018	$\text{kg mol}^{-1}$	Masa molar del agua
A	8.07131		Constante empírica de la fórmula de Antoine
B	1730.63		Constante empírica de la fórmula de Antoine
C	233.426		Constante empírica de la fórmula de Antoine

Tabla 3.1: Constantes usadas en la simulación de la etapa unitaria

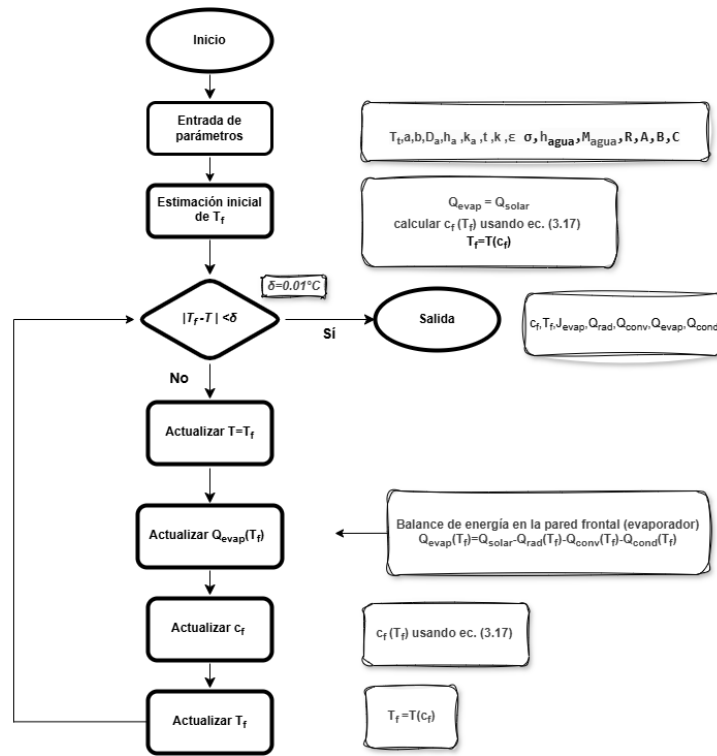
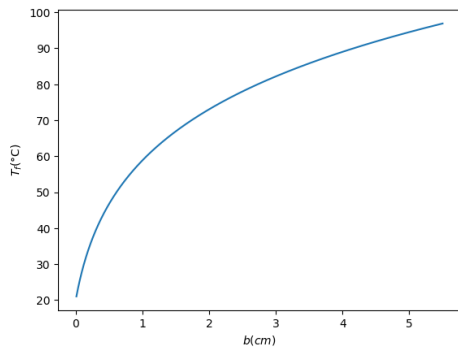


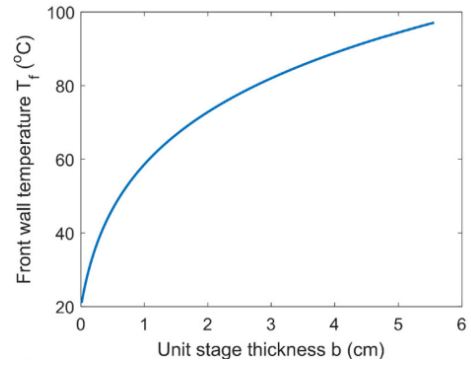
Figura 3.2: Diagrama de flujo etapa unitaria

### 3.2.5. Validación del modelo de etapa unitaria

Se realizó la validación del modelo del destilador de una etapa mediante un análisis comparativo con los resultados del modelo presentado por Zhang *et al.* [1]. Dados los propósitos de esta sección se presenta un perfil de temperaturas, pérdidas y tasa de evaporación en la pared del evaporador que concuerdan con los resultados referenciados anteriormente, lo cual demuestra que las ecuaciones que rigen los fenómenos de transferencia de calor y de masa están correctamente acoplados. Del lado izquierdo se presentan los resultados del presente trabajo.

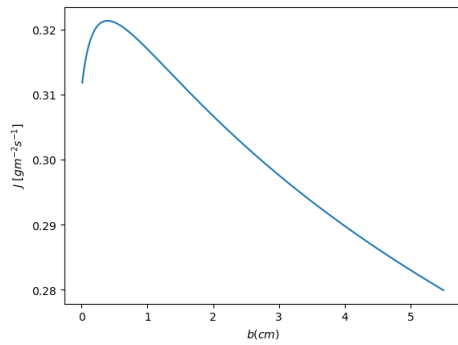


(a) Modelo propuesto

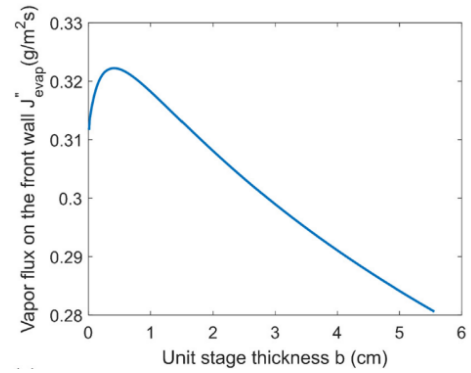


(b) Modelo de Zhang et al.

Figura 3.3: Temperatura en función de la separación entre etapas

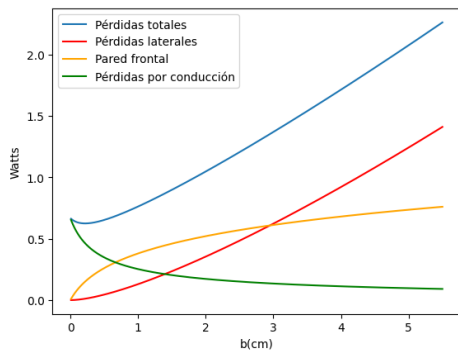


(a) Modelo propuesto

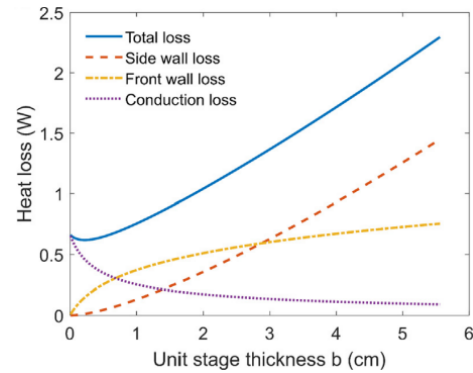


(b) Modelo de Zhang et al.

Figura 3.4: Tasa de evaporación en función de la separación entre etapas



(a) Modelo propuesto



(b) Modelo de Zhang et al.

Figura 3.5: Pérdidas térmicas en función de la separación entre etapas

Como se muestra en la Figura (3.5), los efectos de la geometría afectan significativamente, tanto en las pérdidas como en la transferencia de calor. Conforme aumenta la separación  $b$ , el calor llevado por conducción se vuelve insignificante ( $b \approx 1.5\text{cm}$ ), mientras que las pérdidas en la pared frontal (en el absorbedor) crecen debido a la mala conducción de calor dentro del dispositivo. Las pérdidas laterales se vuelven dominantes a partir de  $b \approx 3\text{cm}$ .

Como se puede observar, las gráficas replican la física del modelo. De la figura 3.4 podemos observar que las pérdidas son mínimas cuando la separación  $b$  en la etapa unitaria es al rededor de  $0.5\text{cm}$  que justamente coincide con el máximo de tasa de evaporación, de acuerdo con la figura 3.3.

Conforme aumenta la separación, la temperatura en la pared frontal también aumenta.

Es importante mencionar que cuando la temperatura se encuentra cercana al punto de ebullición ( $93.5^\circ\text{C}$  en San Luis Potosí), la evaporación se vuelve inestable debido a la formación de burbujas y la saturación en la mecha capilar, por lo que el modelo deja de ser exacto.

De acuerdo con la simulación de elemento finito de *Zhang et al.*, la distribución de la concentración de vapor es lineal para separaciones interfaciales pequeñas ( $b < 3\text{cm}$ ) y el modelo pierde precisión para separaciones más grandes. Sin embargo, los destiladores actuales tienen una separación típica  $< 1\text{cm}$ .

### 3.3. Destilador solar multietapa

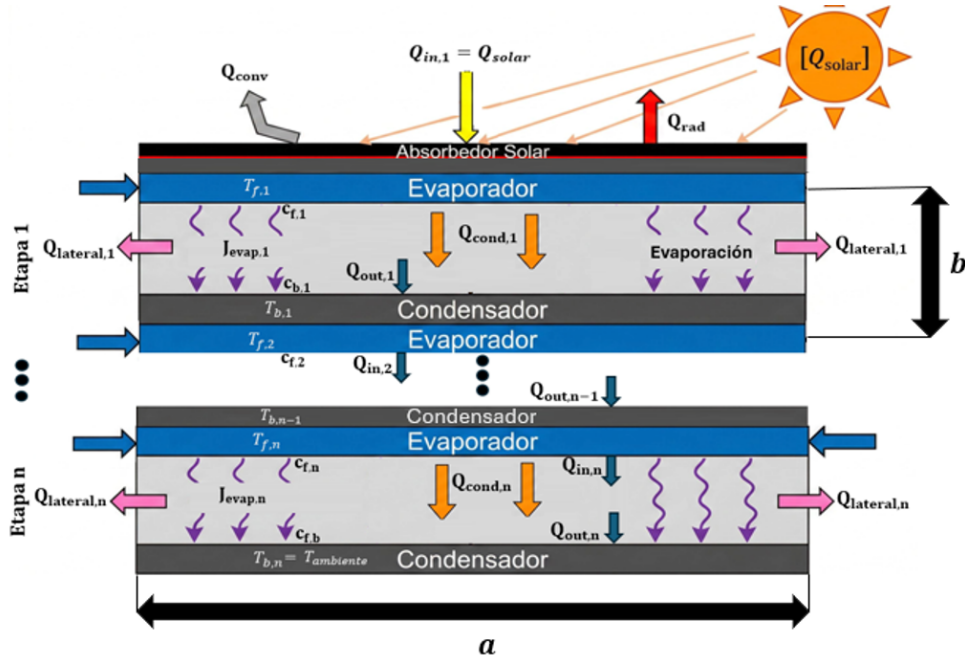


Figura 3.6: Destilador de  $n$  etapas

Se modela un dispositivo de  $n$  etapas, altura  $a$  y separación entre etapas  $b$ . En la figura se muestra el esquema de transferencia de calor así como la disposición de los evaporadores y condensadores en cada etapa.

El balance de energía en la etapa  $i$  es:

$$\begin{cases} a^2 Q_{in,i} = a^2 (Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{out,i}) + 4ab Q_{lateral,i} & i = 1 \\ a^2 Q_{in,i} = a^2 Q_{out,i} + 4ab Q_{lateral,i} & i > 1 \end{cases} \quad (3.19)$$

$Q_{rad}$  y  $Q_{conv}$  se consideran únicamente en la pared frontal.  $Q_{in,i}$  es el flujo de calor entrante en la etapa  $i$  y  $Q_{out,i}$  es el flujo que sale hacia la etapa  $i - 1$  desde la etapa  $i$ :

$$a^2 Q_{out,i} = a^2 (Q_{cond,i} + Q_{net,i}) = a^2 (Q_{cond,i} + Q_{evap,i}) - 4ab Q_{lateral,i} \quad (3.20)$$

$Q_{cond,i}$  representa las pérdidas de calor por conducción en la dirección  $x$  en la etapa  $i$ ,  $Q_{evap,i}$  es el calor liberado durante la evaporación del agua. Observe

que todos los flujos interfaciales dependen de la temperatura en la pared frontal  $T_{f,i}$  y en la pared trasera,  $T_{b,i}$  de cada etapa.

El flujo de vapor, se puede calcular en cada etapa mediante la ley de Fick unidimensional:

$$J_{evap,i} = D_a \frac{c_{f,i} - c_{b,i}}{b} \quad (3.21)$$

donde las concentraciones de vapor saturado dependen de  $T_{f,i}$  y  $T_{b,i}$ , respectivamente.

El acoplamiento entre etapas se debe a que los condensadores (evaporadores de la siguiente etapa) son muy delgados, y la temperatura a la que se encuentra el condensador en la etapa  $i$  es la misma temperatura del evaporador en la etapa  $i - 1$ ; así mismo el flujo de calor saliente de la etapa  $i$  es el calor entrante en la etapa  $i - 1$ :

$$Q_{out,i} = Q_{in,i-1} \quad (3.22)$$

$$T_{b,i-1} = T_{f,i}. \quad (3.23)$$

Las eficiencias se definen de la siguiente manera:

$$\eta_{tot} = \frac{\sum_{etapas} (a^2 Q_{neto} + (4ab) Q_{lateral})}{a^2 Q_{solar}} \quad (3.24)$$

$$\eta_{rec} = \frac{\sum_{etapas} Q_{neto}}{Q_{solar}}. \quad (3.25)$$

### 3.3.1. Desglose del algoritmo

El sistema de ecuaciones se resuelve en sentido inverso, desde la última etapa  $n$  hasta la primera etapa  $i = 1$ , empleando un método numérico iterativo de sustitución sucesiva. El procedimiento comienza estableciendo una primera suposición; se asume que el flujo de calor saliente en la etapa  $n$  es igual al flujo de calor total incidente en la etapa 1:

$$Q_{out,n} = Q_{solar}$$

Para estimar la temperatura  $T_{f,n}$ , se introduce una segunda suposición donde la totalidad del calor saliente en la etapa  $n$  se convierte en calor latente de evaporación en dicha etapa:

$$Q_{evap,n} = Q_{out,n}$$

A partir de estas consideraciones, se calcula  $T_{f,n}$  mediante la Ecuación (3.17) y se realiza una estimación inicial de las pérdidas térmicas, siguiendo un procedimiento idéntico al desarrollado en la sección anterior. Este cálculo se resuelve iterativamente para cada etapa  $i > 1$  de acuerdo con los balances de la Ecuación (3.19) aplicando el método de etapa unitaria, manteniendo el acoplamiento térmico descrito en las Ecuaciones (3.22) y (3.23).

Finalmente, se efectúa el balance de energía para la etapa  $i = 1$  de acuerdo con la Ecuación (3.19). En este punto, se evalúa el criterio de convergencia respecto al calor de entrada:  $|Q_{in,1} - Q_{solar}| < \delta$ . Si la condición no se satisface, el valor del calor saliente de la última etapa se reescala para la siguiente iteración  $j + 1$ :

$$Q_{out,n}^{(j+1)} = \gamma Q_{out,n}^{(j)}$$

donde  $\gamma$  es el factor de convergencia, definido como:

$$\gamma = \frac{Q_{solar}}{Q_{in,1}} \quad (3.26)$$

Este ajuste asegura que el flujo de calor calculado para la primera etapa ( $Q_{in,1}$ ) converja al valor real de entrada ( $Q_{solar}$ ). El proceso se repite hasta alcanzar la convergencia. El diagrama de flujo correspondiente a este algoritmo multietapa se presenta en la Figura 3.7.

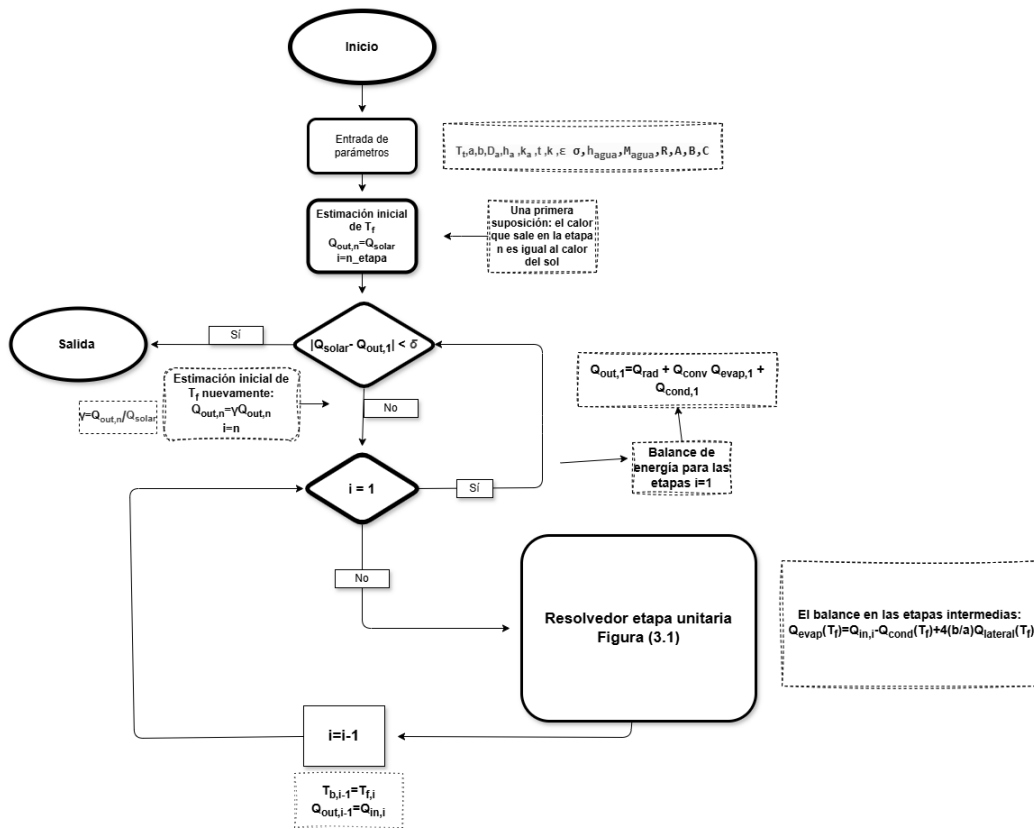
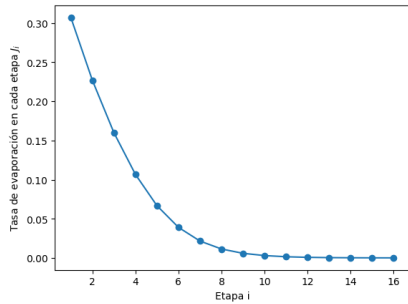


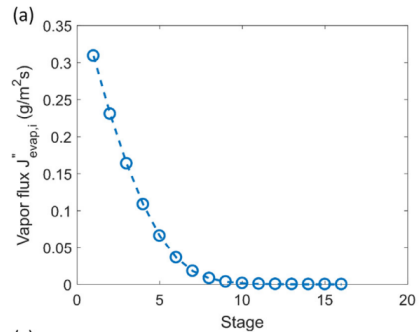
Figura 3.7: Diagrama de flujo destilador de n etapas

### 3.3.2. Validación del modelo

Para verificar el modelo numérico, primero se compara la tasa de evaporación, la transferencia de masa por etapa y la eficiencia del destilador en función del número de etapas con los resultados del modelo de *Zhang et al.*, para una configuración de  $a$  y  $b$  específicas. Posteriormente, para la validación del modelo, se compara la tasa de evaporación obtenida mediante una curva de ajuste con dos trabajos de la literatura: *Xu et al.* y *Bai et al.*



(a) Modelo propuesto



(b) Modelo de Zhang et al.

Figura 3.8: Tasa de evaporación por etapa

En la figura (3.8) se observa que la tasa de evaporación al rededor de la etapa 10 es prácticamente cero, por lo que un dispositivo de más de 10 etapas no es rentable. En la figura (3.9) se muestra cómo crece la eficiencia conforme se aumenta el número de etapas del dispositivo, alcanzando su máximo en al rededor de 600 % para una configuración dada de a y de b. Así mismo, se observa que a partir de 20 etapas, el aumento en la eficiencia es despreciable.

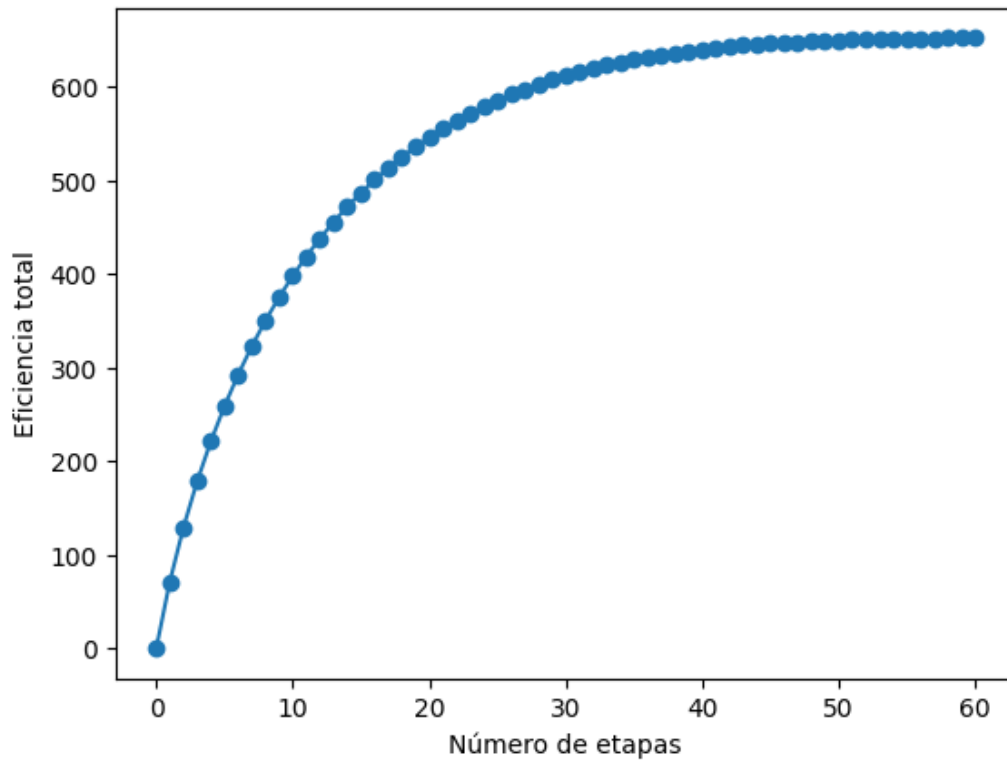


Figura 3.9: Eficiencia vs número de etapas ( $a=0.25\text{cm}$  y  $b=10\text{cm}$ )

En la Figura 3.10 se presenta el perfil de transferencia de masa para un destilador solar de 10 etapas, comparado con los datos de Xu et al. [13]. Se observa que los resultados del modelo numérico se ajustan adecuadamente a las mediciones experimentales.

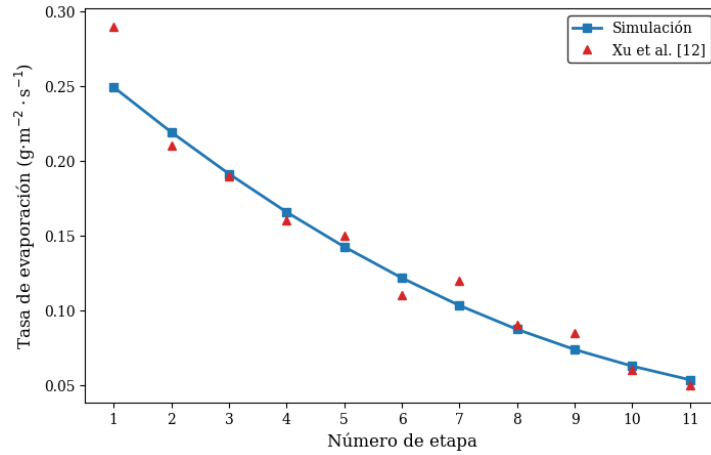


Figura 3.10: Comparación de la tasa de evaporación por etapa con los resultados de Xu et al.

En la Figura 3.11 se presentan los perfiles de distribución de temperatura y la tasa de evaporación para un destilador de 7 etapas, comparados con los resultados de Bai et al. [3] para un sistema acoplado a una celda fotovoltaica.

Las ligeras discrepancias observadas se deben a la simplificación en el modelado de la celda solar. Mientras que la referencia utiliza una simulación detallada del panel, en este modelo se aproximó la eficiencia de la celda mediante una interpolación de los datos experimentales en función de la temperatura.

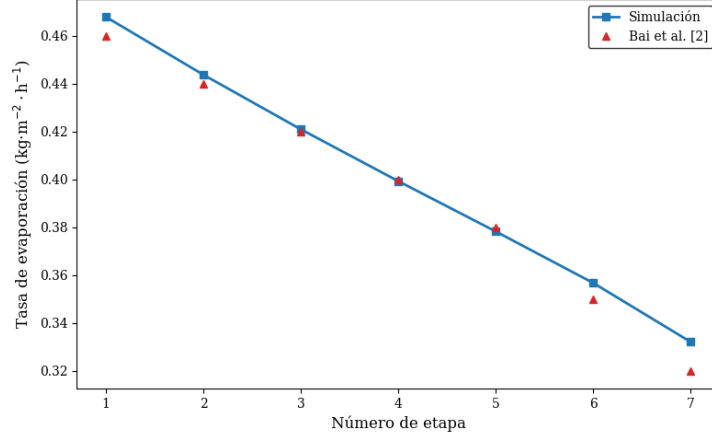


Figura 3.11: Comparación de la tasa de evaporación por etapa con el modelo de Bai et al.

## 3.4. Acoplamiento TEM-Destilador

### 3.4.1. Determinación de las propiedades del TEM

Para realizar el modelado del Peltier, es necesario determinar las constantes  $\alpha$ ,  $\theta$  y  $R$ , las cuales no suelen venir en las hojas de datos que ofrecen los fabricantes, pero pueden ser determinadas experimentalmente o analíticamente tal como se explica en [11, 14]. Los proveedores proporcionan la corriente máxima que soporta el módulo ( $I_{max}$ ) y la diferencia máxima de temperaturas entre ambas caras del módulo a las que puede operar ( $\Delta T_{max}$ ) además de la temperatura de la cara que emite calor ( $T_h$ ) a la cual determinaron  $I_{max}$  y  $\Delta T_{max}$ :

$$\alpha_{TEM} = \frac{U_{max}}{T_h} \quad (3.27)$$

$$R_{TEM} = \frac{U_{max}}{I_{max}} \frac{T_h - \Delta T_{max}}{T_h} \quad (3.28)$$

$$\theta_{TEM} = \frac{\Delta T_{max}}{I_{max} U_{max}} \frac{2T_h}{(T_h - \Delta T_{max})} \quad (3.29)$$

donde  $U_{max} = V|_{I_{max}} = \alpha_{TEM} T_h$  y  $T_h$  es la temperatura con la cual se determinaron  $I_{max}$  y  $\Delta T_{max}$ .

Sin embargo, en la literatura [15] se ha reportado que los coeficientes del módulo varían linealmente con la temperatura media entre las caras  $T_A$  y  $T_E$ . Para capturar estas variaciones y hacer más preciso el modelo, se pueden calcular  $\theta, \alpha$  y  $R$  para dos temperaturas  $T_h$  de referencia y hacer una interpolación.

### 3.4.2. Balance de calor

En la disposición del modelo, la cara que absorbe calor del Peltier (que corresponde a  $Q_A$ ) va hacia el absorbidor solar, mientras que la cara que bombea calor ( $Q_E$ ) va hacia el destilador. Se supone que están en equilibrio térmico,  $T_E$  del módulo está a la misma temperatura que el primer evaporador del destilador  $T_{f,1}$ .

Para hacer el modelado se hace el siguiente balance de energía:

El calor que llega a  $Q_A$  es.

$$Q_A(T_A) = Q_{solar} - Q_{conv}(T_A) - Q_{rad}(T_A) \quad (3.30)$$

donde:

$$\begin{aligned} Q_{rad} &= \epsilon\sigma(T_A^4 - T_\infty^4) \\ Q_{conv} &= h_a(T_A - T_\infty) \end{aligned}$$

El calor que entra hacia el destilador es

$$Q_{in,1} = \frac{q_E}{a^2} = Q_E = Q_A + Q_W. \quad (3.31)$$

El total del calor de entrada pasa a convertirse en calor latente de evaporación de evaporación y conducción. El balance dentro del destilador queda de la siguiente manera:

$$\begin{cases} a^2 Q_{in,i} = a^2(Q_{evap,i} + Q_{cond,i}) & i = 1 \\ a^2 Q_{in,i} = a^2 Q_{out,i} + 4ab Q_{lateral,i} & i > 1 \end{cases} \quad (3.32)$$

donde  $a^2 Q_{out,i} = a^2(Q_{cond} + Q_{evap}) - 4ab Q_{lateral}$ .

y el acoplamiento entre etapas es el mismo:  $Q_{out,i} = Q_{in,i-1}$ ,  $T_{b,i-1} = T_{f,i}$

Se redefinen las eficiencias del destilador de la siguiente manera:

$$\eta_{tot} = \frac{\sum(a^2 Q_{neto} + 4ab Q_{lateral})}{Q_{solar} + Q_W} \quad (3.33)$$

$$\eta_{rec} = \frac{\sum(Q_{neto})}{a^2(Q_{solar} + Q_W)} \quad (3.34)$$

### 3.4.3. Desglose del algoritmo

Se parte de una suposición inicial de  $T_A$  ( $T_{inicial}$ ), la temperatura de la cara del Peltier en la placa que va directo hacia el sol. Se calculan las pérdidas  $Q_{rad}$  y  $Q_{conv}$  usando las Ecuaciones (3.3) y (3.4). Mediante el balance (3.30) se calcula el calor que debe de bombear el Peltier,  $Q_A$ . De la ecuación (2.21), se despeja la temperatura de equilibrio  $T_E$ :

$$T_E = (\alpha_{TEM}\theta_{TEM}I + 1)T_A - (a^2Q_A + \frac{1}{2}I^2R_{TEM})\theta_{TEM}, \quad (3.35)$$

La corriente  $I$  es un parámetro variable,  $T_E$  y  $T_A$  están en  $K$ .

Haciendo uso de la Ecuación (2.22) se calcula  $Q_E$ . Que corresponde al calor de entrada del destilador  $Q_{in,1}$  de acuerdo con la Ecuación (3.31).

Posteriormente se realizan los cálculos de transferencia de calor y masa en el destilador, con los balances de energía de la ecuación (3.32) y se calculan las temperaturas de cada etapa. Como salida se obtiene  $T_{f,1}$ , la temperatura de la primera etapa del destilador.

El criterio de convergencia establece que la temperatura resultante del balance del destilador ( $T_{f,1}$ ) debe coincidir con la temperatura calculada en el balance del módulo termoelectrico ( $T_E$ ) para la iteración actual  $i$ :

$$|T_E^{(l)} - T_{f,1}^{(l)}| < \delta \quad (3.36)$$

Si la condición no se cumple, se define un factor de relajación  $\gamma^{(l)}$  para actualizar la temperatura inicial y utilizarla en la siguiente iteración  $l + 1$ :

$$T_{inicial}^{(l+1)} = \gamma^{(l)}T_{inicial}^{(l)} \quad (3.37)$$

donde el factor de relajación se calcula a partir de los valores de la iteración  $l$ :

$$\gamma^{(l)} = \frac{T_{f,1}^{(l)}}{T_E^{(l)}}. \quad (3.38)$$

El algoritmo se muestra en la figura (3.7).

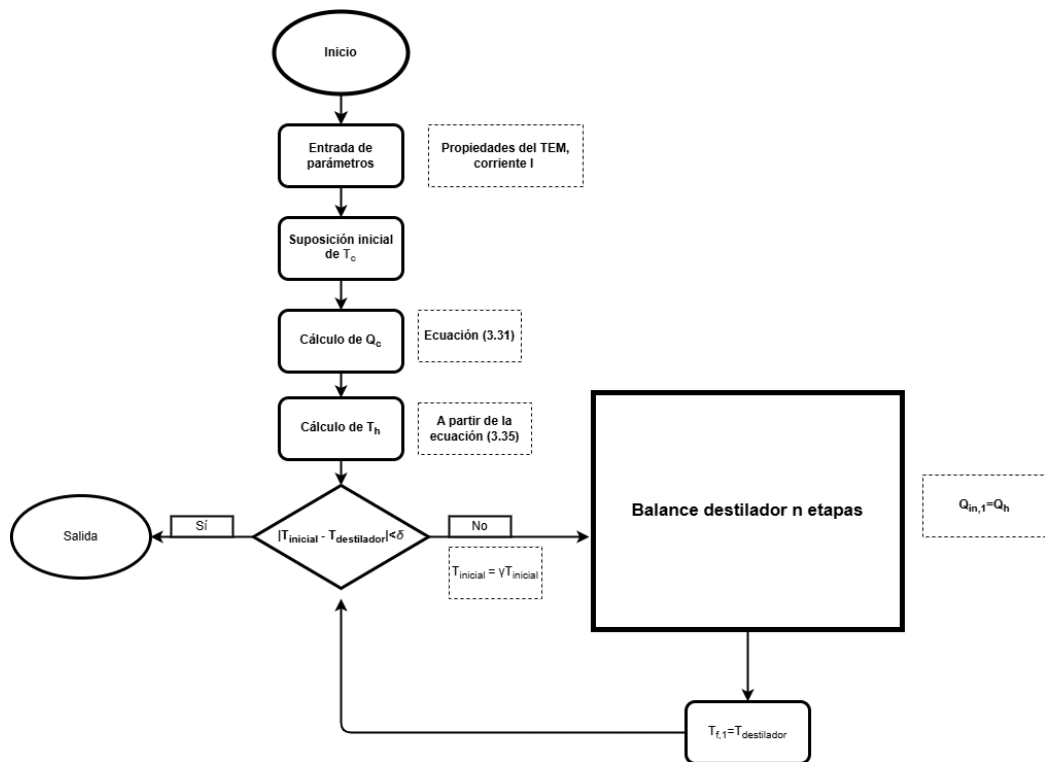


Figura 3.12: Diagrama acoplamiento TEM-Destilador

### 3.4.4. Acoplamiento TEM-Fuente de calor

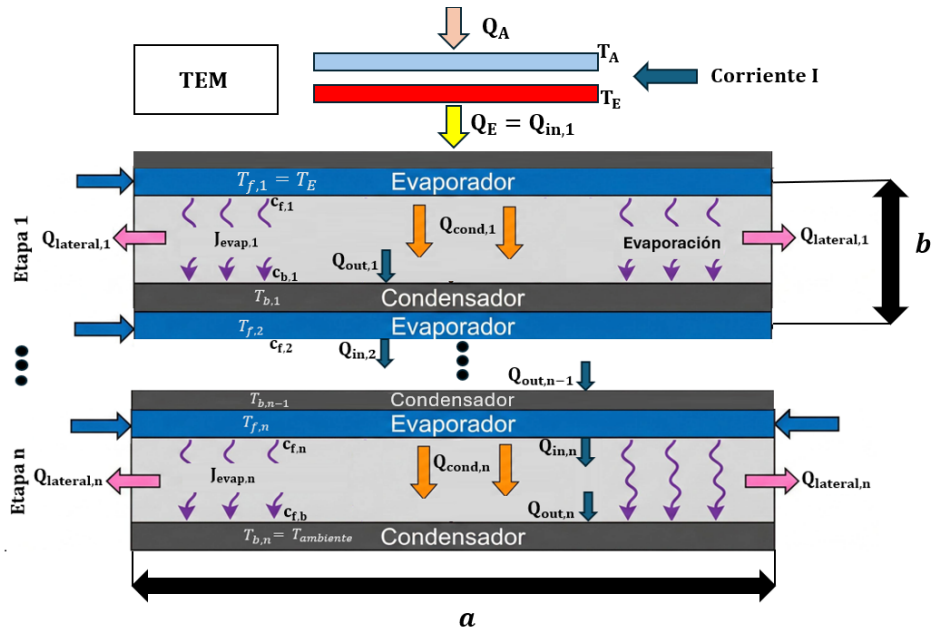


Figura 3.13: Esquema TEM-Destilador

Una de las ventajas que ofrece el destilador es el desacoplamiento del evaporador y condensador de la primera etapa, que a su vez ofrece mayor versatilidad al momento de la elección de la fuente térmica de entrada. La propuesta es bombear calor desde una fuente térmica directamente hacia el destilador mediante un módulo Peltier, dicha fuente térmica debe de cumplir únicamente mantener su temperatura constante durante el proceso de bombeo.

En la disposición de esta simulación, la cara que absorbe calor del Peltier ( $Q_A$ ) va a ir conectada directamente hacia la fuente térmica y la cara que emite calor ( $Q_E$ ) se conecta al evaporador de la primera etapa del destilador.

Se asume que el TEM opera en estado estacionario. Por lo tanto, la cara orientada hacia la fuente de calor se encuentra a la misma temperatura que dicha fuente, y la cara acoplada al destilador está a la temperatura del evaporador de la primera etapa (conformado por una placa metálica de alta conductividad). Esta suposición es válida debido a que la caída de temperatura en la interfaz es numéricamente despreciable: de acuerdo con la ley de

Fourier,  $\Delta T = Q_E R_{placa}$ , asumiendo una densidad de flujo de calor de un sol  $Q_E = 1000 \text{ W m}^{-2}$ , se obtiene  $\Delta T \approx 0,028 \text{ K}$ .

### 3.4.5. Balance de calor

El calor que sale por la cara que emite calor del Peltier está dado por la ecuación (2.22):

$$q_E = \alpha_{TEM} I T_E - \frac{T_E - T_A}{\theta_{TEM}} + \frac{1}{2} I^2 R$$

El flujo de calor que entra hacia la primera etapa es:

$$Q_{in,1} = Q_E = \frac{q_E}{a^2}. \quad (3.39)$$

El balance de energía en del destilador es el siguiente:

$$\begin{cases} a^2 Q_{in,i} = a^2 (Q_{evap,i} + Q_{cond,i}) & i = 1 \\ a^2 Q_{in,i} = a^2 Q_{out,i} + 4ab Q_{lateral,i} & i > 1 \end{cases} \quad (3.40)$$

donde  $a^2 Q_{out,i} = a^2 (Q_{cond} + Q_{evap}) - 4ab Q_{lateral}$ .

y el acoplamiento entre etapas intermedias se mantiene igual  $Q_{out,i} = Q_{in,i-1}$ ,  $T_{b,i-1} = T_{f,i}$

Se evaluaron numéricamente las pérdidas radiativas para caso el caso  $T_A = 20^\circ\text{C}$  y  $T_E \approx 80^\circ\text{C}$ , resultando despreciables. El aluminio pulido tiene una emisividad entre 0.03-0.05 y para esta diferencia de temperaturas, siguiendo la Ley de Stefan-Boltzmann:  $Q_{rad} \approx 13,9 \text{ W m}^{-2}$ , aproximadamente el 1% del calor total de entrada.

Se redefinen las eficiencias del destilador de la siguiente manera:

$$\eta_{tot} = \frac{\sum (a^2 Q_{neto} + 4ab Q_{lateral})}{a^2 Q_E} \quad (3.41)$$

$$\eta_{rec} = \frac{\sum (Q_{neto})}{Q_E} \quad (3.42)$$

### 3.4.6. Desglose del algoritmo

Los coeficientes del módulo Peltier se determinan conforme a lo descrito en la sección anterior.

Para iniciar la iteración  $l$ , el valor de  $T_A$  es constante y se establece como un valor de entrada, en seguida se propone una corriente de operación  $I$  y una semilla para la temperatura  $T_E$ . Con estos parámetros, se calcula el calor  $Q_E$  mediante la Ecuación (2.22). Este término corresponde al calor de entrada del destilador según la Ecuación (3.39), lo que permite resolver el balance de energía dentro del destilador de acuerdo con la Ecuación (3.40) para obtener la temperatura del primer evaporador,  $T_{f,1}$ .

El criterio de convergencia evalúa si la temperatura calculada del evaporador coincide con la temperatura supuesta para el Peltier en la iteración actual  $l$ :

$$|T_E^{(l)} - T_{f,1}^{(l)}| < \delta \quad (3.43)$$

Si la condición no se satisface, se actualiza la temperatura supuesta para la siguiente iteración  $l + 1$ , asignándole el último valor calculado:

$$T_E^{(l+1)} = T_{f,1}^{(l)} \quad (3.44)$$

El proceso se repite hasta alcanzar la convergencia. El diagrama de flujo de este algoritmo se presenta en la Figura 3.12.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

### 4.1. Introducción

En este capítulo se analizan los resultados de la simulación numérica para el sistema acoplado TEM-destilador. La exposición se divide en tres partes fundamentales. Primero, se examina el comportamiento de operación del módulo Peltier, mostrando la competencia térmica entre los fenómenos físicos que determinan la tasa de calor rechazado ( $q_E$ ), así como los efectos en el consumo de potencia ( $q_W$ ) y el coeficiente de desempeño (COP) ante variaciones en la geometría del dispositivo y la fuente térmica. A partir de este análisis, se establecen las conclusiones de diseño del destilador en función de limitantes físicas, como el tamaño de gota o el tamaño de la mecha capilar. Finalmente, se evalúa el rendimiento global del sistema incluyendo métricas como la tasa de evaporación y el consumo específico de energía (SEC) y se presenta una comparativa de su desempeño frente a otras tecnologías de desalinización reportadas en la literatura.

## 4.2. Análisis operativo del Peltier

### 4.2.1. Análisis de la Tasa de Calor Rechazado ( $Q_E$ )

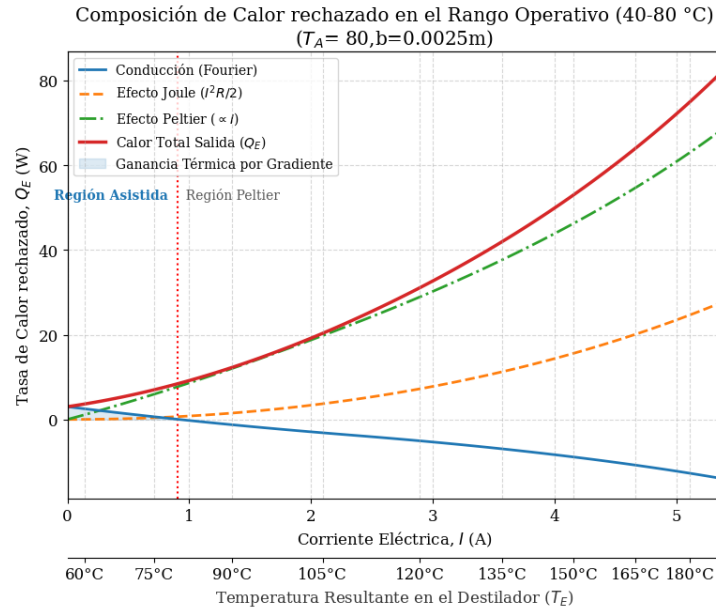


Figura 4.1: Calor rechazado (TEC1-12706)

La potencia térmica total entregada al destilador, denotada como  $Q_E$ , que resulta de la superposición de tres fenómenos físicos fundamentales: el transporte de calor (Efecto Peltier), la generación interna de calor (Efecto Joule) y la transferencia por conducción (Ley de Fourier). Matemáticamente, el balance se expresa por la fórmula (2.27):

$$q_E = \underbrace{\alpha I T_E}_{\text{Peltier } (q_P)} + \underbrace{\frac{1}{2} I^2 R}_{\text{Joule } (q_J)} - \underbrace{K(T_E - T_A)}_{\text{Conducción } (q_F)}$$

A partir de la simulación numérica y el comportamiento de las curvas obtenidas, se destacan las siguientes conclusiones:

#### 1. Existencia y Relevancia de la Zona Asistida

- *Observación:* Se identifica un rango operativo inicial (a bajas corrientes) donde el término de conducción contribuye positivamente al balance ( $q_F < 0$ ).
- *Explicación Física:* En esta etapa, la temperatura del destilador ( $T_E$ ) se mantiene inferior a la temperatura de la fuente ( $T_A$ ). Esto invierte el flujo natural de calor por conducción; el gradiente  $\Delta T$  favorece la conducción térmica desde la fuente hacia el destilador.
- *Conclusión:* A diferencia del efecto Seebeck (analizado en la siguiente sección), el efecto "asistido por Fourier" es termodinámicamente más significativo y ofrece un mayor rango de operación. En esta región ( $T_A > T_E$ ), el calor aportado por conducción ( $q_F$ ) disminuye linealmente conforme la corriente (y por ende  $T_E$ ) aumenta, compitiendo directamente con el efecto Peltier que crece linealmente. El sistema opera en un régimen de "bombeo asistido", aprovechando la energía térmica de la fuente para incrementar  $q_E$  sin costo eléctrico.

## 2. Punto de Transición Térmica Interna

- *Observación:* Existe un valor de corriente específico donde la tasa de calor total rechazada ( $q_E$ ) es numéricamente igual al transporte de calor puramente Peltier ( $q_P$ ).
- *Explicación Física:* Esto ocurre cuando el calor generado por efecto Joule que llega a la cara caliente ( $q_J$ ) se iguala en magnitud a las pérdidas por conducción térmica ( $q_F$ ) que retornan hacia la cara que absorbe calor.
- *Conclusión:* En este punto, los efectos irreversibles (calentamiento Joule y conducción de retorno) se anulan matemáticamente en el balance de energía de la cara caliente. Sin embargo, termodinámicamente representa un límite donde el consumo eléctrico extra se invierte enteramente en el efecto Peltier, marcando el fin del régimen de alta eficiencia.

## 3. Dominancia de Regímenes según la Corriente

- *A Bajas Corrientes ( $I \rightarrow 0$ ):* El término cuadrático de Joule es despreciable. El calor entregado  $q_E$  está dominado por el transporte Peltier y el aporte conductivo. El punto óptimo de operación

termodinámica radica en maximizar el aporte conductivo ( $q_F$ ) respecto a la generación Joule ( $q_J$ ), sin comprometer la estabilidad del sistema.

- *A Altas Corrientes:* El efecto Joule ( $q_J \propto I^2$ ) crece cuadráticamente, convirtiéndose en el componente dominante. En este régimen, el dispositivo actúa mayoritariamente como una resistencia eléctrica, aumentando  $q_E$  a expensas de una drástica caída en la eficiencia.

#### 4. Efecto del Parámetro Geométrico ( $b$ ) en la Transferencia de Calor

- *Observación:* Al aumentar la separación entre etapas ( $b$ ), la región asistida se contrae y el valor máximo de  $q_E$  disminuye.
- *Explicación Física:* Un mayor valor de  $b$  (mayor capa de aire) incrementa la resistencia térmica a través del destilador, dificultando la transferencia de calor entre etapas. Esto provoca un calentamiento mayor de  $T_E$  incluso con corrientes bajas, anulando rápidamente el gradiente favorable ( $T_A > T_E$ ).
- *Conclusión:* Para maximizar el aprovechamiento térmico de la fuente, es preferible una geometría compacta (menor  $b$ ) que retrase el aumento de  $T_E$ , extendiendo la región de operación asistida por conducción.

## 4.2.2. Análisis del Consumo de Potencia Eléctrica ( $q_W$ )

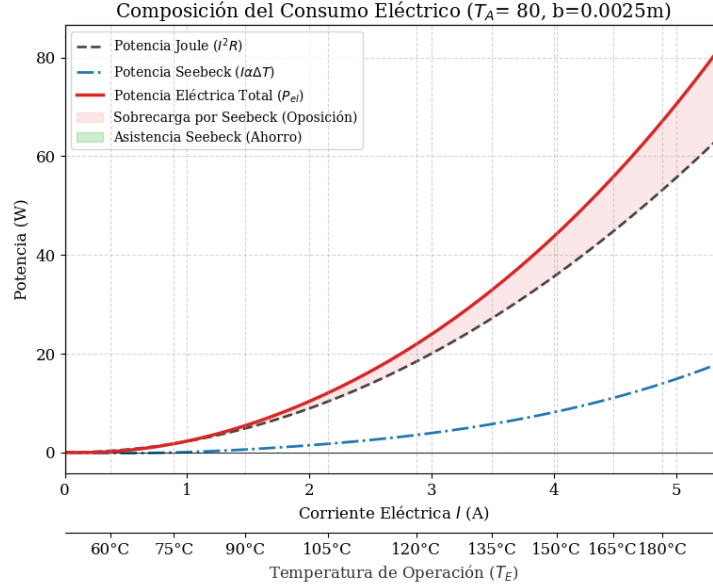


Figura 4.2: Consumo Eléctrico (TEC1-12706)

La potencia eléctrica total consumida por el módulo termoelectrico,  $Q_W$ , se descompone en sus componentes resistivo y termoelectrico:

$$q_W = \underbrace{I^2 R}_{\text{Potencia Joule } (P_J)} + \underbrace{\alpha I (T_E - T_A)}_{\text{Trabajo Seebeck } (P_{Seebeck})} \quad (4.1)$$

El análisis de estas curvas, tomando en cuenta los requerimientos de operación del destilador, muestra lo siguiente :

### 1. Inviabilidad Práctica de la Asistencia Seebeck

- *Observación:* A bajas corrientes, existe una pequeña región donde el término  $P_{Seebeck}$  es pequeño e incluso negativo, dicha región corresponde a los puntos donde  $T_A > T_E$  y  $q_W > 0$  (donde el Peltier no es un generador termoelectrico). Esta región se ha reportado como "Active Cooler" [16], lo que teóricamente, no solo disminuye el consumo total, sino que actúa como un generador que favorece el flujo de electrones.

- *Explicación Física y Limitación:* Aunque el voltaje de Seebeck reduce la demanda eléctrica de la fuente, su impacto real es pequeño. Para que esta "asistencia" sea energéticamente significativa, se requeriría una temperatura de fuente ( $T_A$ ) extremadamente alta.
- *Conclusión:* Las simulaciones demuestran que el punto de máxima asistencia Seebeck rara vez coincide con la temperatura nominal óptima de operación del destilador ( $T_E \approx 80^\circ\text{C}$ ). Peor aún, incrementar  $T_A$  eleva inherentemente la temperatura de equilibrio estacionaria del sistema ( $T_E$  cuando  $I = 0$ ), reduciendo drásticamente el margen de maniobra térmica. Por consiguiente, buscar un punto óptimo de operación fundamentado en la asistencia por voltaje de Seebeck no es viable ni práctico para esta aplicación.

## 2. Dominancia del Régimen Resistivo (Efecto Joule)

- *Observación:* A corrientes altas ( $I > 3 \text{ A}$ ), la potencia eléctrica  $q_W$  es dominada por la potencia de Joule  $P_J$  la contribución de  $P_{Seebeck}$  es pequeña.
- *Explicación Física:* La razón es que la resistencia eléctrica  $R$  total del módulo aumenta con la temperatura a un ritmo mayor que el coeficiente de Seebeck  $\alpha$ , además  $P_J \propto I^2$  y crece a un ritmo mucho mayor que  $P_{Seebeck}$ .
- *Conclusión:* El dispositivo pierde su naturaleza de "bomba de calor" a altas corrientes y se comporta como una resistencia eléctrica ineficiente.

## 3. El Trabajo contra la Fuerza Contraelectromotriz

- *Observación:* Cuando el destilador supera la temperatura de la fuente ( $T_E > T_A$ ),  $P_{Seebeck}$  se vuelve positivo.
- *Explicación Física:* El efecto Seebeck genera ahora un voltaje inverso que se opone a la fuente externa.
- *Conclusión:* Aunque esta fuerza contraelectromotriz representa una carga parásita adicional en el régimen de calentamiento activo, su contribución al consumo total sigue siendo secundaria frente a las pérdidas por efecto Joule.

### 4.2.3. Análisis del Coeficiente de Desempeño (COP) y Estabilidad Operativa

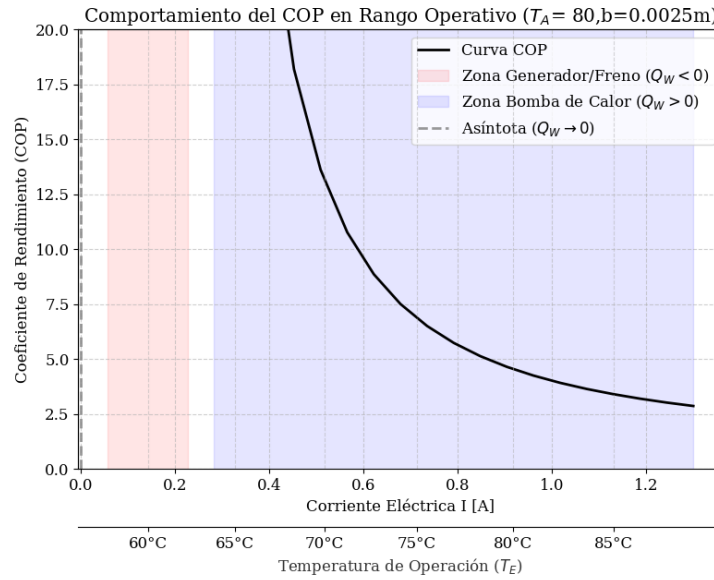


Figura 4.3: Comportamiento del COP (TEC1-12706)

El Coeficiente de Desempeño (COP) evalúa la eficiencia térmica del sistema:

$$COP = \frac{q_E}{q_W} = \frac{\alpha I T_E + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_E - T_A)}{I^2 R + \alpha I(T_E - T_A)} \quad (4.2)$$

El análisis del COP revela no solo la eficiencia, sino los criterios de estabilidad para el control del Peltier y el destilador:

#### 1. Óptimo Teórico (La Asíntota y la Inestabilidad)

- *Observación:* Existe un punto crítico (asíntota vertical en  $I \approx 0,3$  A) donde  $q_W \rightarrow 0$ , lo que matemáticamente dispara el  $COP \rightarrow \infty$ .
- *Explicación Física:* En este estado, el trabajo Seebeck generado iguala exactamente a la disipación resistiva neta y es el punto en que el Peltier pasa de generador termoeléctrico a bomba de calor.

- *Conclusión sobre la Estabilidad:* Operar en estas "zonas dulces" teóricas donde el consumo eléctrico es cercano a cero es poco viable. Dado que el COP es inversamente proporcional a  $q_W$ , cualquier perturbación por pequeña que sea, en la corriente ( $I$ ) o en la temperatura del ambiente provoca fluctuaciones violentas e impredecibles en la eficiencia. Este comportamiento asintótico hace que el sistema se vuelva inestable y difícil de controlar.

## 2. Criterio de Selección del Punto Operacional

- *Observación:* Alejándose de la asíntota ( $I > 0,6$  A) en esta simulación, la pendiente se aplana y tiene un comportamiento más estable.
- *Explicación Física:* Al incrementar la potencia de entrada ( $q_W$ ), el sistema se vuelve más estable ante variaciones en  $I$  o en la temperatura, sacrificando eficiencia a cambio de estabilidad.
- *Conclusión:* El punto de operación óptimo no debe buscarse en el valor máximo del COP, sino en la región donde la curva es estable. El diseño de control debe garantizar que el COP no fluctúe drásticamente ante pequeñas variaciones de corriente, asegurando simultáneamente que la contribución térmica "gratuita" por conducción ( $q_F$ ) se mantenga lo más alta posible respecto a las pérdidas por Joule ( $q_J$ ).

## 3. Transición en el Equilibrio Térmico con la Fuente ( $\Delta T = 0$ )

- *Observación:* Existe un punto de operación crítico donde la temperatura de la cara acoplada al destilador alcanza la temperatura de la fuente de calor ( $T_E \approx T_A$ ), anulando el gradiente térmico a través del módulo termoeléctrico.
- *Explicación Física:* En este estado, el acoplamiento térmico pasivo proveniente de la fuente desaparece: tanto el flujo de calor por conducción (Fourier) que ingresaba naturalmente por gradiente de temperatura hacia el destilador, como la potencia eléctrica generada por el efecto Seebeck, se reducen a cero. La entrada de energía al destilador queda dictada exclusivamente por el bombeo activo ( $q_P$ ) y la disipación resistiva ( $q_J$ ).

- *Conclusión:* Termodinámicamente, este punto marca la frontera donde la fuente externa deja de "inyectar" calor de forma gratuita. Define el fin del régimen de "bombeo asistido" y da inicio el régimen de bombeo puramente activo, a partir del cual el módulo requerirá un costo eléctrico cada vez mayor para lograr que el destilador supere la temperatura de la fuente térmica ( $T_E > T_A$ ).

### 4.3. Conclusiones de Diseño

Para determinar la configuración operativa óptima, se analizaron los resultados numéricos obtenidos a partir del modelo haciendo una variación en la separación entre etapas del destilador y para dos temperaturas de fuente distintas. Las tablas 5.1 y 5.2 resumen el comportamiento del sistema para una temperatura de fuente constante  $T_A = 100^\circ\text{C}$  y  $T_A = 20^\circ\text{C}$ , respectivamente a una temperatura objetivo de operación del destilador  $T_E \approx 80^\circ\text{C}$  y  $T_E \approx 85^\circ\text{C}$ .

A partir de estos datos y las tendencias observadas en las simulaciones, se establecen las siguientes conclusiones para el diseño experimental del prototipo:

Separación $b$ [mm]	Temp. Operación $T_E$ [ $^\circ\text{C}$ ]	Producción $\dot{m}$ [ml/h]	Potencia $q_w$ [W]	COP [-]	Consumo Específico SEC [Wh/L]
2.5	80.0	100.1	8.76	0.97	87.5
3.0	80.7	90.2	7.95	0.93	88.1
3.5	80.8	77.4	7.25	0.89	93.7
4.0	80.0	65.5	6.53	0.86	99.7

Tabla 4.1: Rendimiento del sistema a una temperatura de fuente ( $T_A = 20^\circ\text{C}$ ). El consumo específico de energía (SEC) denota el requerimiento eléctrico por litro de destilado.

1. **Eficiencia del Bombeo Térmico y Temperatura de Fuente ( $T_A$ ):**  
Se observa que al aumentar la temperatura de la fuente de calor  $T_A$ , el gradiente térmico a través del módulo Peltier favorece el flujo natural de energía. Esto permite que el dispositivo opere en un régimen de alta eficiencia, disminuyendo drásticamente el consumo eléctrico ( $q_w$ ) y elevando el Coeficiente de Rendimiento (COP), ya que el módulo actúa asistiendo un flujo favorable.

Separación $b$ [mm]	Temp. Operación $T_E$ [°C]	Producción $\dot{m}$ [ml/h]	Potencia $q_W$ [W]	COP [-]	Consumo Específico SEC [Wh/L]
2.5	84.6	126.2	1.26	8.04	10.0
3.0	85.6	109.2	0.92	9.64	8.4
3.5	85.6	93.5	0.61	12.57	6.5
4.0	84.8	79.3	0.36	18.83	4.5

Tabla 4.2: Rendimiento del sistema con temperatura de fuente ( $T_A = 100^\circ\text{C}$ ) para un punto de operación de  $T_E \approx 85^\circ\text{C}$ . El consumo específico de energía (SEC) refleja el requerimiento eléctrico por litro de destilado.

- 2. Influencia de la Separación entre Etapas ( $b$ ):** Existe una relación entre la separación  $b$  y la potencia requerida  $q_W$ . Conforme  $b$  disminuye, también lo hace la capa de aire y, por tanto, las resistencias al transporte de calor y masa en el destilador disminuyen (los flujos de transporte son  $\propto 1/b$  conforme a las Leyes de Difusión de Fick y de Conducción de Fourier). Esto facilita una mayor tasa de evaporación, lo cual exige al Peltier bombear activamente una mayor cantidad de calor, elevando el consumo. Inversamente, al aumentar  $b$ , la resistencia difusiva del aire domina, disminuyendo el flujo de calor y reduciendo tanto la producción de destilado como la demanda eléctrica.
- 3. Dominancia del Transporte sobre las Pérdidas Geométricas:** La eficiencia térmica propia del destilador mejora al aumentar el flujo de calor de entrada. Esto se debe a un factor geométrico: las pérdidas térmicas por las paredes laterales son proporcionales al área lateral ( $A_{lat} \propto a \cdot b$ , donde  $a$  es la altura), mientras que el transporte útil de calor es inversamente proporcional a la separación ( $\propto 1/b$ ). Para valores pequeños de  $b$ , el transporte útil crece significativamente más rápido que las pérdidas laterales.
- 4. Criterio de Optimización Costo-Beneficio:** Si bien aumentar  $b$  reduce el consumo eléctrico, la penalización en la tasa de producción de agua es más drástica (caída del  $\sim 35\%$  caso  $T_A = 20^\circ\text{C}$  y  $\sim 40\%$  caso  $T_A = 100^\circ\text{C}$ ). Dado que el costo energético es despreciable en ambos casos, resulta más estratégico priorizar la maximización de la tasa de producción  $\dot{m}$ . Por lo tanto, se concluye que una separación menor es la opción de diseño más prudente, ofreciendo un volumen de destilado superior con un costo energético operativo que se mantiene

extremadamente bajo. El valor mínimo de  $b$  está limitado por el tamaño de gota del agua condensada.

5. **Viabilidad:** Es crucial destacar que, incluso bajo condiciones adversas ( $T_A = 20^\circ\text{C}$ ), el dispositivo mantiene su viabilidad operativa y de producción debido a los bajos costos energéticos por litro de agua destilada. Esto confirma que el sistema es robusto y económicamente competitivo independientemente de las condiciones térmicas externas, validando su operación incluso cuando no se dispone de calor residual de alta calidad. Sin embargo, bajo este escenario el Peltier opera en condiciones extremas (normalmente operan a una diferencia de temperaturas máxima de  $\approx 60^\circ\text{C}$ )
6. **Límites Físicos y Teóricos de la Temperatura de Operación ( $T_E$ ):** Una vez establecida la mínima separación entre etapas viable ( $b$ ), maximizar la tasa de producción de destilado requiere elevar la temperatura en la primera etapa del destilador ( $T_E$ ) mediante la inyección de calor ( $q_E$ ). Sin embargo, la selección del punto de operación está limitada por la física del destilador. Teóricamente, el modelo predictivo de transferencia de calor y masa se fundamenta en relaciones empíricas como la ecuación de Antoine, cuya validez se restringe al intervalo de  $0^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$ . Además acercar  $T_E$  al punto de ebullición cambia drásticamente el régimen de transferencia: pasar de una evaporación interfacial controlada a una ebullición con formación de burbujas vuelve impredecible el transporte de vapor y amenaza el funcionamiento de la mecha capilar por bloqueo de vapor ("*dry-out*"). En conclusión, la máxima tasa de producción del dispositivo no puede escalar indefinidamente con el calor suministrado, sino que está restringida por una temperatura máxima de operación segura en el régimen previo a la ebullición.

## 4.4. Rendimiento

### 4.4.1. Comparación entre con diferentes alturas del dispositivo

Al escalar la longitud del dispositivo de 10 cm a 15 cm, el área efectiva de transferencia de calor (evaporación y condensación) experimenta un incremento del 125 % (pasando de  $100\text{ cm}^2$  a  $225\text{ cm}^2$ ). Los resultados demuestran

que el impacto de este escalamiento geométrico en el rendimiento no es estrictamente lineal y depende fuertemente de la temperatura de la fuente. Bajo condiciones adversas (fuente a 20°C), la ampliación del área resulta altamente favorable: la producción de destilado crece en un 141.8% (superando el aumento geométrico) y el coeficiente de desempeño (COP) mejora de 0.97 a 1.21, debido a una distribución térmica más eficiente que reduce el estrés térmico sobre el módulo Peltier. Por el contrario, al operar con una fuente térmica de alta temperatura (100°C), el aumento en la producción (+89.2%) no logra compensar proporcionalmente la extensión del área, lo que se traduce en una penalización del flujo másico específico y una reducción en el COP general del sistema. Sin embargo, la dimensión del dispositivo está limitada por la mecha capilar y su longitud de capilaridad.

#### 4.4.2. Comparación con otros destiladores

En la figura 4 se muestra una tabla comparativa entre los diferentes sistemas de destiladores, multietapa y de otras tecnologías. Se observa la tasa de producción de cada uno de ellos, la conversión energía calor el flujo de calor de entrada. Los resultados muestran una tasa de condensación competitiva frente a las mejores tecnologías actualmente, igualmente el SEC es muy competitivo.

En el contexto de destiladores solares, el *Gained Output Ratio* (GOR) es un parámetro adimensional que cuantifica la eficiencia térmica del sistema. Relaciona la energía necesaria para evaporar la masa de agua producida frente a la energía externa suministrada:

$$GOR = \frac{\dot{m}_{dest} h_{fg}}{Q_{entrada}} \quad (4.3)$$

Para sistemas multietapa, el GOR describe la capacidad de recuperación de calor latente en cada etapa sucesiva:

$$GOR_{destilador} = \frac{\sum_{etapas} (\dot{m}_{etapa,i} h_{fg})}{Q_{entrada}} \quad (4.4)$$

En este trabajo, al emplear un acoplamiento híbrido Peltier-Destilador, se define un GOR de sistema ( $GOR_{sist}$ ), el cual integra el desempeño de la bomba de calor con la eficiencia del destilador solar:

$$GOR_{sist} = COP \times GOR_{destilador} \quad (4.5)$$

Este indicador representa cuántos watts eléctricos de entrada se convirtieron en watts útiles de evaporación.

En la Figura 4.4 se muestra una comparativa entre diferentes tipos de destiladores, tanto multietapa como asistidos por otras tecnologías. Para el análisis, se estableció una temperatura de operación del destilador de  $T_E \approx 80 \text{ }^\circ\text{C}$  y dos temperaturas de fuente distintas:  $T_A = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_A = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se evaluaron cuatro separaciones entre etapas para observar los cambios en la tasa de evaporación ( $J$ ), el COP del Peltier y, por tanto, el GOR. Se observa que el sistema alcanza tasas de evaporación competitivas y un GOR significativamente superior a la literatura. Este fenómeno se explica por la optimización del salto térmico. Al aumentar la temperatura de la fuente ( $T_A$ ), la diferencia de temperatura que el Peltier debe bombear disminuye drásticamente; esto dispara el COP del módulo, permitiendo que el sistema recupere calor con un gasto eléctrico mínimo, sin embargo, como se muestra en la figura 4.3 este punto de operación corresponde a un punto inestable donde el destilador es muy sensible a pequeñas variaciones del sistema que provocarían cambios drásticos en el COP y en el GOR.

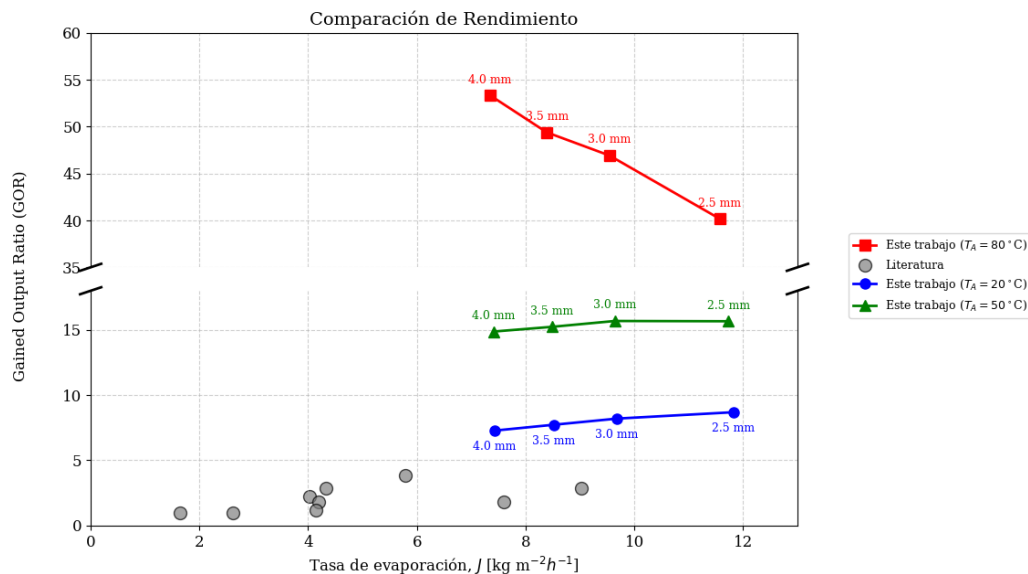


Figura 4.4: Comparativa de la tasa de evaporación ( $J$ ) y el rendimiento térmico (GOR) de este trabajo frente a tecnologías recientes de la literatura [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 13].

Para establecer una métrica del consumo eléctrico del dispositivo, se utiliza el estándar del SEC (Consumo Específico de Energía), que mide la energía utilizada para producir una unidad de producto. En este caso se utiliza el consumo en  $[kWh/kg]$  de agua evaporada:  $SEC = \text{Consumo eléctrico}/\text{kg de agua}$ . En nuestro sistema:

$$SEC = \frac{q_w}{\dot{m}_{dest}} = \frac{h_{fg}}{GOR_{sist}}. \quad (4.6)$$

Se muestran algunos valores en la tabla 4.3:

Tabla 4.3: Consumo Específico de Energía (SEC) eléctrico en función de la temperatura de la fuente ( $T_A$ ) y la separación entre etapas ( $b$ ).

$T_A$ (°C)	Separación $b$ (mm)	GOR	SEC Eléctrico (kWh/kg)
20	2.5	8.68	73.89
20	4.0	7.27	88.22
50	2.5	15.66	40.95
50	4.0	14.87	43.13
80	2.5	40.17	15.96
80	4.0	53.31	12.03

El modelo teórico muestra un dispositivo prometedor, con una tasa de evaporación competitiva frente a las tecnologías actuales y un consumo eléctrico que se mantiene competitivo incluso en los escenarios operativos menos favorables. A diferencia de los destiladores solares, que se encuentran a merced de las condiciones climáticas, este sistema puede operar de manera continua, manteniendo una tasa de producción uniforme y ajustable a las necesidades durante las 24 horas del día. Además, debido a su bajo requerimiento eléctrico, cuenta con la flexibilidad de ser alimentado mediante paneles solares. Finalmente, el verdadero valor de esta configuración radica en el aprovechamiento de calor residual a altas temperaturas, lo que permite recuperar esta energía térmica sin costo adicional.

# Apéndice A

## Código Etapa Unitaria

En este apéndice se presenta el código fuente implementado en Python para resolver los balances de energía y masa correspondientes a una etapa unitaria del destilador.

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.interpolate import interp1d
4
5 # =====
6 # Las constantes conocidas del sistema
7 # =====
8 Q_sun = 1000          # W/m2
9 T_inf = 20           # Celsius
10 a = 0.05             # altura y ancho del dispositivo (m)
11 # b se define en el bucle for
12 D_a = 3*10**(-5)    # Difusividad del vapor de agua m2/s
13 h_a = 3.7           # (W/m2K) coeficiente de
14                       transferencia de calor por convección
15 h_a_side = 10       # (W/m2K) coeficiente de convección
16                       en paredes laterales
17 k_a = 0.026         # (W/mK) conductividad térmica del
18                       aire
19 t = 0.01            # (m) ancho del aislante en las
20                       paredes
21 k = 0.05            # (W/mK) conductividad térmica del
22                       material aislante
23 ε = 0.03            # emisividad del material
24 h_fg = 2357000      # (J/kg) Entalpía de vaporización
25 σ = 5.67*10**(-8)  # Constante de Stefan-Boltzman (W/(
26                       m2K*4))
```

```

21 R_side = 1/h_a_side + t/k # Resistencia térmica en las
    paredes laterales
22 M_H2O = 0.018 # (Kg/mol) Peso molecular del agua
23
24 # =====
25 # Listas de Python para guardar los resultados
26 # =====
27 c_f_tot = []
28 T_f_tot = []
29 J_tot = []
30 Q_cond_tot = []
31 Q_evap_tot = []
32 Q_side_tot = []
33 Q_rad_tot = []
34 Q_conv_tot = []
35 q_out_tot = []
36 Q_net_tot = []
37 eff_tot_tot = []
38 eff_rec_tot = []
39
40 # =====
41 # Calculo las concentraciones de vapor saturado y la curva de
    interpolación
42 # =====
43 R = 8.314 # J/mol·K
44 M = 0.018015 # kg/mol (masa molar del agua)
45
46 # Un rango de 20-110°C con 200 puntos es más que suficiente
    para una buena interpolación.
47 T_C = np.linspace(20, 110, 200)
48 T_K = T_C + 273.15
49
50 # Fórmula empírica de Antoine para presión de saturación
51 A = 8.07131
52 B = 1730.63
53 C = 233.426
54 P_sat_mmHg = 10**(A - B / (T_C + C))
55 P_sat_Pa = P_sat_mmHg * 133.322
56
57 # Concentración de vapor en equilibrio Ecuación (3.16)
58 c_eq = (P_sat_Pa * M) / (R * T_K)
59
60 # Se crea la función de interpolación para la concentración
61 T_de_c = interp1d(c_eq, T_C, bounds_error=False, fill_value="
    extrapolate")

```

```

62
63 # =====
64 # Función para calcular las pérdidas
65 # =====
66 def calculos_calores(T_f, T_b, Q_in, c_f, c_b):
67     T_f_K = T_f + 273.15          # Temperatura de la pared
        frontal
68     T_b_K = T_b + 273.15          # Temperatura de la pared
        posterior
69     T_inf_K = T_inf + 273.15      # Temperatura de la pared
        más alejada
70     T_med_K = (T_f_K + T_b_K) / 2 # Temperatura promedio por
        etapa
71
72     J = D_a * (c_f-c_b)/b          # Transporte de vapor
73     Q_rad = ε * σ * (T_f_K**4 - T_inf_K**4) # Pérdidas por
        radiación
74     Q_conv = h_a * (T_f_K - T_inf_K) # Pérdidas por
        convección
75     Q_cond = k_a * (T_f_K - T_b_K) / b # Pérdidas por
        conducción
76     Q_side = (T_med_K - T_inf_K) / R_side # Pérdidas por
        paredes laterales
77     Q_evap = h_fg * D_a * (c_f - c_b) / b # Calor llevado
        por evaporación
78
79     q_out = a**2 * (Q_evap + Q_cond) - 4 * a * b * Q_side #
        Calor que sale a la siguiente etapa
80     Q_net = (q_out - a**2 * Q_cond) / a**2 #Calor
        neto
81     eff_tot = (a**2 * Q_net + 4 * a * b * Q_side) / (a**2 *
        Q_in) #Eficiencia de recuperación
82     eff_rec = Q_net / Q_in #
        Eficiencia total
83     return Q_rad, Q_conv, Q_cond, Q_side, Q_evap, q_out,
        Q_net, J, eff_tot, eff_rec
84
85 # =====
86 # BUCLE PRINCIPAL: Barrido paramétrico variando la separación
87 # =====
88 x = np.linspace(0.0001, 0.055, 4000) # Valores que va a tomar
        b (separación entre etapas)
89 for i in range(len(x)):
90     T_b = 20
91     b = x[i]

```

```

92     Q_in = Q_sun
93
94     c_b = (10**(A - B / (T_b + C)) * M) * 133.322 / (R * (T_b
          + 273.15))
95
96     # Estimación inicial fuera del bucle para calcular T_f
97     Q_evap_est = Q_sun
98     c_f_est = Q_evap_est * b / (D_a * h_fg) + c_b
99     T_f = T_de_c(c_f_est)
100
101     # Bucle de convergencia para el balance de energía
102     max_iter_outer = 100 # <-- BREAK DE SEGURIDAD
103     for iter1 in range(max_iter_outer):
104
105         # Bucle de convergencia para la temperatura T_f
106         T_vieja = -999 # Valor inicial para asegurar que el
          bucle comience
107         max_iter_inner = 100 # <-- BREAK DE SEGURIDAD
108         for iter2 in range(max_iter_inner):
109             if abs(T_vieja - T_f) < 0.001:
110                 break # Convergencia de temperatura alcanzada
111
112                 T_vieja = T_f #Actualización de la variable T_f
113
114                 # 1. Calcular calores que dependen directamente
          de T_f
115                 Q_rad, Q_conv, Q_cond, Q_side, _, _, _, _, _ =
          calculos_calores(T_f, T_b, Q_in, 0, 0)
116
117                 # 2. Calcular Q_evap a partir del balance de
          energía
118                 Q_evap = Q_in - Q_cond - Q_rad - Q_conv
119
120                 # 3. Calcular la nueva concentración y la nueva
          temperatura
121                 c_f = Q_evap * b / (D_a * h_fg) + c_b
122                 T_f = T_de_c(c_f)
123
124                 # Después de converger T_f, calcular Q_ref con los
          valores consistentes
125                 Q_ref = Q_evap + Q_rad + Q_conv + Q_cond
126
127                 if abs(Q_sun - Q_ref) < 0.01: #Tolerancia
128                     break # Convergencia de energía alcanzada
129

```

```

130     # 4. Ajustar Q_in para la siguiente iteración del
        balance
131     Q_in = (Q_sun / Q_ref) * Q_in
132
133     # Recalcular todos los valores finales con los datos ya
        convergidos
134     Q_rad, Q_conv, Q_cond, Q_side, Q_evap, q_out, Q_net, J,
        eff_tot, eff_rec = calculos_calores(T_f, T_b, Q_in,
        c_f, c_b)
135
136     # Guardar resultados
137     T_f_tot=np.append(T_f_tot,T_f)
138     Q_cond_tot=np.append(Q_cond_tot, Q_cond)
139     Q_side_tot=np.append(Q_side_tot, Q_side)
140     Q_evap_tot=np.append(Q_evap_tot, Q_evap)
141     Q_rad_tot=np.append(Q_rad_tot, Q_rad)
142     Q_conv_tot=np.append(Q_conv_tot, Q_conv)
143     q_out_tot=np.append(q_out_tot, q_out)
144     Q_net_tot=np.append(Q_net_tot, Q_net)
145     J_tot=np.append(J_tot, J)
146     eff_tot_tot=np.append(eff_tot_tot, eff_tot)
147     eff_rec_tot=np.append(eff_rec_tot, eff_rec)
148     c_f_tot=np.append(c_f_tot, c_f)
149
150     print("Simulación completada.")

```

# Apéndice B

## Código Destilador $n$ etapas

En este apéndice se presenta el código fuente implementado en Python para resolver los balances de energía y masa correspondientes a un destilador de  $n$  etapas.

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.interpolate import interp1d
4
5 # =====
6 # Las constantes conocidas del sistema
7 # =====
8 Q_sun = 1000          # W/m2
9 T_inf = 25           # Celsius
10 a     = 0.1          # altura y ancho del dispositivo (m)
11 b     = 0.01         # ancho del dispositivo (separación
    entre etapas)
12 D_a   = 3*10**(-5)   # Difusividad del vapor de agua m2/s
13 h_a   = 5.37         # (W/m2K) coeficiente de
    transferencia de calor por convección #NOTA 2, aquí la
    corregí
14 h_a_side = 5.37     # (W/m2K) coeficiente de convección
    en paredes laterales
15 k_a   = 0.026       # (W/mK) conductividad térmica del
    aire
16 t     = 0.01        # (m) ancho del aislante en las
    paredes
17 k     = 0.05        # (W/mK) conductividad térmica del
    material aislante
18 ε     = 0.03        # emisividad del material
19 h_fg  = 2357000     # (J/kg) Entalpía de vaporización
```

```

20  $\sigma$  = 5.67*10**(-8) # Constante de Stefan-Boltzman (W/(
    m2K*4))
21 R_side = 1/h_a_side + t/k # Resistencia térmica en las
    paredes laterales
22 M_H2O = 0.018 # (Kg/mol) Peso molecular del agua
23
24 # =====
25 # Listas de Python para guardar los resultados
26 # =====
27 T_f_tot = []
28 T_b_tot = []
29 J_tot = []
30 Q_cond_tot = []
31 Q_evap_tot = []
32 Q_side_tot = []
33 Q_net_tot = []
34 q_out_tot = []
35
36 # =====
37 # Calculo las concentraciones de vapor saturado y la curva de
    interpolación
38 # =====
39 R = 8.314 # J/mol·K
40 M = 0.018015 # kg/mol (masa molar del agua)
41
42 # Un rango de 20-110°C con 200 puntos es más que suficiente
    para una buena interpolación.
43 T_C = np.linspace(20, 110, 200)
44 T_K = T_C + 273.15
45
46 # Fórmula empírica de Antoine para presión de saturación
47 A = 8.07131
48 B = 1730.63
49 C = 233.426
50 P_sat_mmHg = 10**(A - B / (T_C + C))
51 P_sat_Pa = P_sat_mmHg * 133.322
52
53 # Concentración de vapor en equilibrio Ecuación (3.16)
54 c_eq = (P_sat_Pa * M) / (R * T_K)
55
56 # Se crea la función de interpolación
57 T_de_c = interp1d(c_eq, T_C, bounds_error=False, fill_value="
    extrapolate")
58
59 # =====

```

```

60 # Función para calcular las pérdidas
61 # =====
62 def calculos_calores(T_f, T_b, Q_in, c_f, c_b):
63     T_f_K = T_f + 273.15      # Temperatura de la pared
64                               # frontal
65     T_b_K = T_b + 273.15      # Temperatura pared posterior
66     T_inf_K = T_inf + 273.15  # Temperatura de la pared más
67                               # alejada (pared inmersa en la salmuera)
68     T_med_K = (T_f_K + T_b_K) / 2 # Temperatura promedio por
69                               # etapa
70
71     J = D_a * (c_f - c_b) / b   # Transporte de vapor
72     Q_rad = ε * σ * (T_f_K**4 - T_inf_K**4) # Pérdidas por
73           # radiación (solo ocurre en etapa 1)
74     Q_conv = h_a * (T_f_K - T_inf_K) # Pérdidas por
75           # convección (solo ocurre en etapa 1)
76     Q_cond = k_a * (T_f_K - T_b_K) / b # Pérdidas por
77           # conducción
78     Q_side = (T_med_K - T_inf_K) / R_side # Pérdidas por
79           # paredes laterales
80     Q_evap = h_fg * D_a * (c_f - c_b) / b # Calor llevado
81           # por evaporación
82
83     q_out = a**2 * (Q_evap + Q_cond) - 4 * a * b * Q_side #
84           # Calor que sale a la siguiente etapa
85     Q_net = (q_out - a**2 * Q_cond) / a**2
86
87     return Q_rad, Q_conv, Q_cond, Q_side, Q_evap, q_out,
88           Q_net, J
89
90 # =====
91 # BUCLE PRINCIPAL: Simulación multicapa (n etapas)
92 # =====
93 T_b_inicial = T_inf
94 Q_in_inicial = Q_sun
95
96 c_b_inicial = (10**((A - B / (T_b_inicial + C)) * M) * 133.322
97               / (R * (T_b_inicial + 273.15)))
98
99 # Estimación inicial fuera del bucle
100 Q_evap_est = Q_sun
101 c_f_est = Q_evap_est * b / (D_a * h_fg) + c_b_inicial
102 T_f = T_de_c(c_f_est)

```

```

93 max_iter_externas = 100 # Límite de seguridad para el bucle
    externo
94 tolerancia = 0.01      # Tolerancia para la convergencia de
    Q_ref
95
96 for iter_externa in range(max_iter_externas):
97
98     # 1. REINICIO DE CONDICIONES Y ARREGLOS
99     # Se reinician las condiciones al comienzo de cada
        simulación completa
100     T_b = T_b_inicial
101     c_b = c_b_inicial
102     Q_in = Q_in_inicial
103
104     # Se vacían los arrays de resultados para no acumular
        basura de la iteración anterior
105     T_f_tot = np.array([T_b_inicial])
106     Q_cond_tot = np.array([])
107     Q_side_tot = np.array([])
108     Q_evap_tot = np.array([])
109     q_out_tot = np.array([])
110     J_tot = np.array([])
111     c_f_tot = np.array([c_b_inicial])
112
113     # 2. BUCLE DE ETAPAS
114     n_etapa = 11      # Número total de etapas a simular
115     for i in range(n_etapa):
116
117         # =====Cálculo de T_f =====
118         T_vieja = -999 # Valor inicial para asegurar que el
            bucle comience
119         max_iter_inner = 100
120         for iter2 in range(max_iter_inner):
121             if abs(T_vieja - T_f) < 0.001:
122                 break # Convergencia de temperatura alcanzada
123
124             T_vieja = T_f
125
126             Q_rad, Q_conv, Q_cond, Q_side, _, _, _, _ =
                calculos_calores(T_f, T_b, Q_in, 0, 0)
127
128             Q_evap = Q_in - Q_cond + 4*b/a*Q_side
129
130             c_f = Q_evap * b / (D_a * h_fg) + c_b
131             T_f = T_de_c(c_f)

```

```

132     # =====
133
134     # Calcular todos los valores finales de la etapa con
135     # los datos convergidos
136     Q_rad, Q_conv, Q_cond, Q_side, Q_evap, q_out, Q_net,
137     J = calculos_calores(T_f, T_b, Q_in, c_f, c_b)
138
139     # Acoplamiento iterativo: lo que sale de esta etapa
140     # entra a la siguiente
141     T_b = T_f
142     c_b = c_f
143     Q_in = (q_out + 4*a*b*Q_side)/a**2
144
145     # Se guardan los valores físicos de la etapa actual
146     T_f_tot = np.append(T_f_tot, T_f)
147     Q_cond_tot = np.append(Q_cond_tot, Q_cond)
148     Q_side_tot = np.append(Q_side_tot, Q_side)
149     Q_evap_tot = np.append(Q_evap_tot, Q_evap)
150     Q_net_tot = np.append(Q_net_tot, Q_net)
151     q_out_tot = np.append(q_out_tot, Q_in)
152     J_tot = np.append(J_tot, J)
153     c_f_tot = np.append(c_f_tot, c_f)
154
155     # 3. COMPROBACIÓN DEL BALANCE DE ENERGÍA EN LA ETAPA 1
156     Q_ref = Q_rad + Q_conv + Q_cond + Q_evap
157
158     print(f"Iteración externa #{iter_externa + 1}: Q_ref = {
159           Q_ref:.2f} W/m^2 | Objetivo Q_sun = {Q_sun:.2f} W/m^2"
160         )
161
162     if abs(Q_ref - Q_sun) < tolerancia:
163         print("\n¡Convergencia alcanzada! El balance de energ
164             ía es correcto.")
165         break # Se detiene el ciclo de reescalado externo
166     else:
167         # 4. REESCALADO DE Q_in_inicial PARA LA SIGUIENTE
168         # ITERACIÓN
169         Q_in_inicial = (Q_sun / Q_ref) * Q_in_inicial
170         print(f"Reescalando... Nuevo Q_in_inicial para la pró
171             xima iteración: {Q_in_inicial:.2f} W/m^2\n")
172
173     # Mensaje final de control
174     if iter_externa == max_iter_externas - 1:
175         print("\nADVERTENCIA: Se alcanzó el límite de iteraciones
176             externas sin lograr cerrar el balance de energía.")

```

# Apéndice C

## Código Fuente Térmica

En este apéndice se presenta el código fuente implementado en Python para resolver los balances de energía y masa correspondientes al acoplamiento TEM-destilador. También muestra el modelado matemático del TEM y la corrección en las constantes del mismo.

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.interpolate import interp1d
4
5 # =====
6 # Las constantes conocidas
7 # =====
8 Q_sun = 1000 # W/m2
9 T_inf = 23 # Celsius
10 a = 0.1 # altura y ancho del dispositivo (m
    )
11 b = 0.0025 # ancho del dispositivo (separación
    entre etapas)
12 D_a = 3*10**(-5) # Difusividad del vapor de agua m2/
    s
13 h_a_side= 5.37 # coeficiente de convección lateral
14 k_a = 0.026 # (W/mK) conductividad térmica
15 t = 0.0127 # (m) ancho del aislante en las
    paredes
16 k = 0.022 # (W/mK) conductividad térmica del
    material
17 ε = 0.03 # emisividad del material
18 h_fg = 2357000 # (J/kg) Entalpía de vaporización
19 σ = 5.67*10**(-8) # Constante de Stefan-Boltzman (W/(
    m2K*4))
```

```

20 R_side = 1/h_a_side + t/k # Resistencia térmica en las
    paredes laterales
21 M_H2O = 0.018 # (Kg/mol) Peso molecular del agua
22
23 # =====
24 # Propiedades del TEM (Modelo TEC1-12706)
25 # =====
26 # Estas propiedades las da el fabricante a T=25 C
27 I_max_1=5.6 # Corriente máxima que se le puede
    aplicar al TEM
28 U_max_1=3.6 # V(I_max)=U_max #Ver Lineykyn
29 dT_max_1=65 # Máxima diferencia de temperaturas a las
    que puede operar el módulo
30 T_h_1=300.15 # Temperatura del lado caliente a las que
    se calcularon I_max,U_max,dt_max en K
31
32 # Parámetros equivalentes del TEM a 25 C
33 alpha_TEM_1=U_max_1/T_h_1 # coeficiente de Seebeck
    del TEM
34 R_TEM_1=(U_max_1/I_max_1)*(T_h_1-dT_max_1)/T_h_1 #
    Resistencia del TEM
35 tetha_TEM_1= (dT_max_1/(I_max_1*U_max_1))*((2*T_h_1)/(T_h_1-
    dT_max_1)) # Resistencia térmica del TEM
36
37 # Estas propiedades las da el fabricante a T=50 C
38 I_max_2=5.6 # Corriente máxima que se le puede aplicar
    al TEM
39 U_max_2=4.1 # V(I_max)=U_max #Ver Lineykyn
40 dT_max_2=73 # Máxima diferencia de temperaturas a las
    que puede operar el módulo
41 T_h_2=323.15 # Temperatura del lado caliente a las que
    se calcularon I_max,U_max,dt_max en K
42
43 # Parámetros equivalentes del TEM a 50 C
44 alpha_TEM_2=U_max_2/T_h_2 # coeficiente de Seebeck del
    TEM
45 R_TEM_2=(U_max_2/I_max_2)*(T_h_2-dT_max_2)/T_h_2 #
    Resistencia del TEM
46 tetha_TEM_2= (dT_max_2/(I_max_2*U_max_2))*((2*T_h_2)/(T_h_2-
    dT_max_2)) # Resistencia térmica del TEM
47
48 # =====
49 # Funciones de interpolación/extrapolación para las
    propiedades del TEM
50 # =====

```

```

51 T_refs = [T_h_1, T_h_2] # Temperaturas de referencia (eje X)
52
53 # 1. Función para Coeficiente Seebeck (alpha)
54 f_alpha = interp1d(T_refs, [alpha_TEM_1, alpha_TEM_2],
55                    bounds_error=False,
56                    fill_value="extrapolate")
57
58 # 2. Función para Resistencia Eléctrica (R)
59 f_R = interp1d(T_refs, [R_TEM_1, R_TEM_2], bounds_error=False
60                  ,
61                  fill_value="extrapolate")
62
63 # 3. Función para Resistencia Térmica (theta)
64 f_theta = interp1d(T_refs, [theta_TEM_1, theta_TEM_2],
65                    bounds_error=False,
66                    fill_value="extrapolate")
67
68 # =====
69 # Listas de Python, que son mucho más rápidas para añadir
70 # elementos.
71 # =====
72 T_f_tot      = []
73 T_b_tot      = []
74 J_tot        = []
75 Q_cond_tot   = []
76 Q_evap_tot   = []
77 Q_side_tot   = []
78 Q_net_tot    = []
79 q_out_tot    = []
80
81 T_destilador_tot=[]
82 T_obj_tot     = []
83 Q_destilador_tot=[]
84 Q_c_tot       = []
85 Q_rad_TEM_tot=[]
86 Q_conv_TEM_tot= []
87
88 # =====
89 # Calculo las concentraciones de vapor saturado y la curva de
90 # interpolación
91 # =====
92 R = 8.314 # J/mol·K
93 M = 0.018015 # kg/mol (masa molar del agua)
94

```

```

90 # Un rango de 20-110°C con 20000 puntos es más que suficiente
    para una buena interpolación.
91 T_C = np.linspace(20, 110, 20000)
92 T_K = T_C + 273.15
93
94 # Fórmula empírica de Antoine para presión de saturación
95 A = 8.07131
96 B = 1730.63
97 C = 233.426
98 P_sat_mmHg = 10**(A - B / (T_C + C))
99 P_sat_Pa = P_sat_mmHg * 133.322
100
101 # Concentración de vapor en equilibrio
102 c_eq = (P_sat_Pa * M) / (R * T_K)
103
104 # Se crea la función de interpolación
105 T_de_c = interp1d(c_eq, T_C, bounds_error=False, fill_value="
    extrapolate")
106
107 # =====
108 # Función para calcular los calores y flujos acoplados
109 # =====
110 def calculos_calores(T_f, T_b, Q_in, c_f, c_b):
111     T_f_K = T_f + 273.15           # Temperatura de la
        pared frontal
112     T_b_K = T_b + 273.15           # Temperatura conocida (
        pared posterior)
113     T_inf_K = T_inf + 273.15       # Temperatura de la
        pared más alejada
114     T_med_K = (T_f_K + T_b_K) / 2
115
116     J = D_a * (c_f - c_b) / b
        # Transporte de
        vapor
117     Q_cond = k_a * (T_f_K - T_b_K) / b
        # Pérdidas por conducción
118     Q_side = (T_med_K - T_inf_K) / R_side
        # Pérdidas por paredes
        laterales
119     Q_evap = h_fg * D_a * (c_f - c_b) / b
        # Calor llevado por evaporación
120
121     q_out = a**2 * (Q_evap + Q_cond) - 4 * a * b * Q_side
        # Calor que sale a la siguiente etapa
122     Q_net = (q_out - a**2 * Q_cond) / a**2

```

```

123
124     return Q_cond, Q_side, Q_evap, q_out, Q_net, J
125
126 # =====
127 # Definición de los dominios de los parámetros de estudio
128 # =====
129 b_valores=[0.0025,0.003,0.0035,0.004] #Son cuatro
        separaciones
130 I_valores=np.linspace(0,5.6,80) # Valores que tomará I (
        dependen del TEM)
131
132 # =====
133 # Matrices donde guardaré los resultados (tamaño de la malla
        b vs I)
134 # =====
135 eta_tot=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores))) #
        Eficiencia total para cada b e I
136 eta_rec=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores))) #
        Eficiencia de recuperación para cada b e I
137 T_E_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores))) #
        Temperatura de la cara caliente
138 Q_E_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores))) # Calor
        que llega a la cara fría
139
140 T_f_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores),11))
141 J_I_b =np.zeros((len(b_valores), len(I_valores),10))
142
143 Q_net_tot_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores)))
144 Q_side_tot_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores)))
145
146 Q_F_tot_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores))) #
        Calor de Fourier
147 Q_J_tot_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores))) #
        Calor de Joule
148 Q_P_tot_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores))) #
        Calor Peltier
149
150 alpha_TEM_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores)))
151 R_TEM_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores)))
152 tetha_TEM_I_b=np.zeros((len(b_valores), len(I_valores)))
153
154 #
        =====

```

```

155 # BUCLE PRINCIPAL: Barrido paramétrico sobre la separación b
      y la corriente I
156 #
      =====
157 for z in range(len(b_valores)):
158
159     T_A=50      # Temperatura fuente de calor
160     T_E=(273+T_A)+30 # Suposición inicial esta va en K # T_{
      E} desde el peltier
161     b=b_valores[z]
162
163     for j in range(len(I_valores)):
164
165         I=I_valores[j]
166
167         T_f=60          # Temperatura que sale por T_{h}
      luego del balance del destilador.
168
169         max_iter_TEM=100 ### Break de seguridad
170
171         T_med_TEM=((T_E+T_A+273.15)+(T_E+T_A+273.15))/2
172
173         alpha_TEM=f_alpha(T_med_TEM)
174         tetha_TEM=f_tetha(T_med_TEM)
175         R_TEM=f_R(T_med_TEM)
176
177         for iter_TEM in range(max_iter_TEM):
178
179             if abs(T_f - (T_E-273.15) ) < 0.01: # T_f es la
      temperatura luego del balance en el
      destilador
180                 break # Convergencia de temperatura
      alcanzada en el acoplamiento
181
182             #Coeficientes del TEM
183
184             #Reescalamiento
185
186             T_E=(T_f+273.15)
187
188             Q_E = alpha_TEM*I*T_E - (T_E-(T_A+273.15))/
      tetha_TEM + 1/2*I**2*R_TEM
189             Q_destilador = Q_E/a**2 # Este es Q_{h},
      T_destilador es T_{h}

```

```

190
191     T_b_inicial = T_inf
192     Q_in_inicial = Q_destilador # <Acoplamiento TEM
193     -DESTILADOR>
194
195     c_b_inicial = (10**(A - B / (T_b_inicial + C)) *
196     M) * 133.322 / (R * (T_b_inicial + 273.15))
197
198     # Estimación inicial fuera del bucle
199     Q_evap_est = Q_destilador #W
200     c_f_est = Q_evap_est * b / (D_a * h_fg) +
201     c_b_inicial
202     T_f = T_de_c(c_f_est)
203
204     max_iter_destilador = 100 # Límite de seguridad
205     para el bucle externo
206     tolerancia = 0.01 # Tolerancia para la
207     convergencia de Q_ref
208
209     for iter_T_f in range(max_iter_destilador):
210
211         # 1. REINICIO DE CONDICIONES Y ARREGLOS
212         # Se reinician las condiciones al comienzo de
213         cada simulación completa
214         T_b = T_b_inicial
215         c_b = c_b_inicial
216         Q_in = Q_in_inicial #W
217
218         # Se vacían los arrays, los uso para calcular
219         las eficiencias
220         Q_side_tot = []
221         Q_net_tot = []
222         J_tot = []
223         T_f_tot = [T_inf]
224
225         # 2. BUCLE DE ETAPAS DEL DESTILADOR
226         n_etapa=10 # Número de etapas
227         for i in range(n_etapa):
228
229             #===== Cálculo de T_f de la
230             etapa actual
231             T_vieja = -999
232             max_iter_inner = 100
233             for iter2 in range(max_iter_inner):
234                 if abs(T_vieja - T_f) < 0.001:

```

```

227         break
228
229         T_vieja = T_f
230
231         __, __, Q_cond, Q_side, __, __, __, __ =
                calculos_calores(T_f, T_b, Q_in, 0,
                                0)
232
233         Q_evap = Q_in - Q_cond + 4*b/a*Q_side
                #      '''Lo
                cambié'''
234
235         c_f = Q_evap * b / (D_a * h_fg) + c_b
236         T_f = T_de_c(c_f)
237         #=====
238
239         Q_rad, Q_conv, Q_cond, Q_side, Q_evap,
                q_out, Q_net, J = calculos_calores(T_f
                , T_b, Q_in, c_f, c_b)
240
241         if max_iter_inner == max_iter_inner - 1:
242             print("\nADVERTENCIA: Se alcanzó el nú
                    mero máximo de iteraciones sin
                    lograr la convergencia (Etapa T_f).")
                )
243
244         # Acoplamiento entre las etapas del
                destilador
245         T_b=T_f
246         c_b=c_f
247         Q_in=(q_out+4*a*b*Q_side)/a**2
248
249         # Se guardan los valores de cada etapa
250         Q_side_tot=np.append(Q_side_tot, Q_side)
251         Q_net_tot=np.append(Q_net_tot, Q_net)
252         J_tot      =np.append(J_tot,J)
253         T_f_tot   =np.append(T_f_tot,T_f)
254
255         # 3. COMPROBACIÓN DEL BALANCE DE ENERGÍA (
                Después del ciclo for)
256         # Se usan los valores de la última etapa
                guardados en los arrays
257         Q_ref = Q_rad + Q_cond + Q_evap
258

```

```

259     #print(f"Iteración externa #{iter_externa +
        1}: Q_ref = {Q_ref:.2f} W/m^2 | Objetivo
        Q_destilador = {Q_destilador:.2f} W/m^2")
260
261     if abs(Q_ref - Q_destilador) < tolerancia:
262         #print("\n;Convergencia alcanzada! El
            balance de energía es correcto.")
263         break # Se detiene el ciclo 'while'
264     else:
265         # 4. REESCALADO DE Q_in PARA LA SIGUIENTE
            ITERACIÓN
266         # Se ajusta el valor inicial de Q_in para
            la próxima simulación completa
267         Q_in_inicial = (Q_destilador / Q_ref) *
            Q_in_inicial
268         #print(f"Reescalando... Nuevo
            Q_in_inicial para la próxima iteración
            : {Q_in_inicial:.2f} W/m^2\n")
269
270         # Mensaje final en caso de no converger el
            balance del destilador
271         if max_iter_destilador == max_iter_destilador -
            1:
272             print("\nADVERTENCIA: Se alcanzó el número má
                ximo de iteraciones sin lograr la
                convergencia (Destilador).")
273
274         # Valores de eficiencia para la configuración de b e
            I actual
275         eficiencia=np.sum(a**2*Q_net_tot+4*a*b*Q_side_tot)/((
            Q_E))*100
276         eta_tot[z,j]=eficiencia # EFICIENCIA TOTAL, en z
            corresponde a valores de b y en j a los valores de
            I
277         #eta_rec[z,j]=Q_net_tot/(Q_E)*100 # EFICIENCIA DE
            RECUPERACIÓN
278
279         T_E_I_b[z,j] =T_E
280         Q_E_I_b[z,j] =Q_E
281
282         Q_F_tot_I_b[z,j]=(T_E-(T_A+273.15))/tetha_TEM
283         Q_J_tot_I_b[z,j]=1/2*I**2*R_TEM
284         Q_P_tot_I_b[z,j]=alpha_TEM*I*T_E
285
286         R_TEM_I_b[z,j]=R_TEM

```

```

287     alpha_TEM_I_b[z,j]=alpha_TEM
288     tetha_TEM_I_b[z,j]=tetha_TEM
289
290     J_I_b[z,j,:] = J_tot # Aquí guardo para cada b (z
      ), y corriente I (j), la distribución de J a través
      s de las 10 etapas
291     T_f_I_b[z,j,:] = T_f_tot # Aquí guardo para cada b (z
      ), y corriente I (j), la distribución de T_f a
      través de las 10 etapas
292
293     if max_iter_TEM == max_iter_TEM - 1:
294         print("\nADVERTENCIA: Se alcanzó el número má
      ximo de iteraciones sin lograr la
      convergencia (TEM).")

```

# Bibliografía

- [1] L. Zhang, Z. Xu, B. Bathia, B. Li, and L. Wang, “Modeling and performance analysis of high-efficiency thermally-localized multistage solar stills,” *Applied Energy*, vol. 266, no. 2, p. 144848, 2020.
- [2] E. Chiavazzo, M. Morciano, F. Viglino, M. Fasano, and P. Asinari, “Passive solar high-yield seawater desalination by modular and low-cost distillation,” *Nature Sustainability*, vol. 1, no. 12, pp. 763–772, 2018.
- [3] B.-L. Bai, S. Du, M.-J. Li, X.-D. Xue, and W.-Q. Tao, “A novel solar-driven water and electricity cogeneration integrated system by multistage vaporization enthalpy recycling,” *Desalination*, vol. 542, p. 116040, 2022.
- [4] M. A. Villan, A. Suresh, M. Misra, C. N. Ruiz, N. R. Cameron, S. K. Saha, and S. Chandramouli, “Ultrathin, unsinkable, janus-faced solar-thermal interfacial evaporator for high-throughput seawater distillation and solar-water production,” *Advanced Science*, vol. 12, p. 202511600, 2025.
- [5] K. Ramzy, M. Abdelgaleel, M. Alswat, A. E. Kabeel, H. Mosalam, and E. A. AbdelAziz, “Enhancing the performance of a solar distiller using phase change materials integrated with peltier modules and heaters: Energy, exergy, and economic analysis,” *Energy Conversion and Management*, vol. 286, p. 117081, 2023.
- [6] H. T. Kim, L. Philip, A. McDonagh, M. Johir, J. Ren, H. K. Shon, and L. D. Tijning, “Recent advances in high-rate solar-driven interfacial evaporation,” *Energy & Environmental Materials*, vol. 6, no. 2, p. e12345, 2023.

- [7] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. McGraw-Hill, 3 ed., 2007.
- [8] “ASTM G173-03(2020) Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface,” 2020.
- [9] A. F. Ioffe, *Semiconductors Thermoelements and Thermoelectric Cooling*. London, U.K.: Infosearch Limited, 1957.
- [10] A. M. Mitofsky, *Direct Energy Conversion*. New York: Wiley, 1970.
- [11] . S. Lineykin y S. Ben-Yaakov, “Modeling and analysis of thermoelectric modules,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 2, pp. 505–512, 2007.
- [12] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 4 ed., 2013.
- [13] Z. Xu, L. Zhang, L. Zhao, B. Li, B. Bhatia, C. Wang, K. L. Wilke, Y. Song, O. Labban, J. H. Lienhard, R. Wang, and E. N. Wang, “Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar still,” *Energy & Environmental Science*, vol. 13, no. 3, pp. 830–839, 2020.
- [14] J. A. Chávez, J. A. Ortega, J. Salazar, A. Turó, and M. J. García, “Spice model of thermoelectric elements including thermal effects,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 3, pp. 655–661, 2000.
- [15] O. Yamashita, H. Odahara, T. Ochi, and K. Satou, “Dependence of seebeck coefficient on a load resistance and energy conversion efficiency in a thermoelectric composite,” *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 20, p. 202108, 2009.
- [16] M. Zebarjadi, “Electronic cooling using thermoelectric devices,” *Applied Physics Letters*, vol. 106, p. 203506, 2015.
- [17] J. Zhu, J. Liu, J. Liu, S. Guo, S. Lu, Y. Lv, and B. Song, “Fdm 3d-printed volcanic-shaped structure for ultrafast solar-driven interfacial evaporation and efficient energy utilization,” *Desalination*, vol. 548, p. 116275, 2023.

- [18] T. Gao, X. Wu, Y. Wang, G. Owens, and H. Xu, "A hollow and compressible 3d photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation without energy loss," *Solar RRL*, vol. 5, p. 202100053, 2021.
- [19] Y. Wang, Y. Shang, X. Sun, Q. Yang, and Y. Zhang, "Enhancing freshwater production via customizable and highly efficient solar-driven seawater desalination," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 15, p. 40595, 2023.
- [20] H. W. Lim, S. H. Park, and S. J. Lee, "Three-dimensional spiral evaporator with side channels for efficient solar-driven water purification," *Desalination*, vol. 550, p. 116368, 2023.
- [21] X. Wu, Z. Wu, Y. Wang, T. Gao, Q. Li, and H. Xu, "All-cold evaporation under one sun with zero energy loss by using a heatsink inspired solar evaporator," *Advanced Science*, vol. 8, p. 2002501, 2021.
- [22] Y. Guo, Y. Sui, J. Zhang, Z. Cai, and B. Xu, "An all-day solar-driven vapor generator via photothermal and joule-heating effects," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 8, p. 25178, 2020.
- [23] J. Su, Q. Chang, C. Xue, J. Yang, and S. Hu, "Multipurpose solar-thermal hydrogel platform for desalination of seawater and subsequent collection of atmospheric water," *Solar RRL*, vol. 6, p. 2200767, 2022.
- [24] Y. Liu, B. Luo, H. Liu, M. He, R. Wang, L. Wang, Z. Quan, J. Yu, and X. Qin, "Solar evaporation performance of 3d-printed concave structures filled with activated carbon under low convective flow," *Chemical Engineering Journal*, vol. 452, p. 139402, 2023.