

Análisis de la transferencia de calor en un proceso de termólisis asistido por un termosifón de sodio

Cristian Gonzalo Gamba Puentes, Simón Octavio Arias Castro

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Juan Pablo Flórez Mera

Ph.D. Ingeniería mecánica

Codirector

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Ph.D. Ingeniería química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería mecánica

Ingeniería mecánica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Primeramente, a Dios y a la vida por permitirme llegar y culminar este hito importante.

A mi madre María Nubia, a mi padre José Gonzalo, por enseñarme a afrontar la vida con coraje, paciencia y constancia, por apoyarme, creer en mí y encontrar en ello un motivo de su orgullo, por darme la fortaleza y motivación de mejorar con cada día, a veces es difícil describir lo orgulloso que me siento de que sean mis padres.

A mi hermana Yiced Andrea, por ser más que mi hermana, una amiga, y consejera, por compartir recuerdos inolvidables que le han dado siempre significado al amor que tenemos como hermanos.

Cristian Gonzalo Gamba Puentes

Dedicatoria

A Dios, que me dio la fuerza para poder culminar con una etapa tan importante en la vida.

A mi madre, Eduviges, quien siempre me ha apoyado a pesar de la distancia brindando un amor incondicional. Este logro es un sacrificio de ella y para ella, gracias a ella busco mejorar cada día más.

A mi hermana Amada, el motor de mi vida, la persona que siempre ha estado orgullosa de mí, el reflejo de que las palabras no siempre logran capturar el amor por alguien.

A mi padre Raúl, quien desde el firmamento guía mi camino, el que me inculco el amor por esta vocación, el ejemplo de hombre que quiero llegar a ser. Este logro también es un reflejo del excelente padre que fuiste.

A Gresly, quien me acompañó en todo momento durante gran parte de este proceso final, aquella que supo ver dones donde otros solo veían defectos.

A María Luisa y Carlos, por brindarme un segundo hogar y una segunda familia sin buscar nada a cambio.

Simon Octavio Arias Castro

Agradecimientos

A Dios, por encontrar en Él un refugio en los momentos intrincados.

Agradecer al profe Juan Pablo por la paciencia, y el tiempo que dedicó a la asesoría para la realización del trabajo.

A mis amigos, por el apoyo incondicional, por las risas, los consejos en especial en estos últimos meses, por ayudarme a encontrarme en los momentos difíciles, por ser compañeros de dichas y penas, y encaminarme a buscar soluciones que no encontraba.

A Andrea Cagua por encontrar en ella una amiga incondicional, un corazón lleno de bondad y voluntad de ayuda para quien lo necesite, por las interminables tertulias, el compartir de sueños, pensamientos y críticas constructivas, por demostrarme que la vida recompensa con personas como tú.

A Gustavo Cerati, por su música que se convirtió en compañera de vida, y que me recordó innumerables veces que todo tarda en llegar, y al final hay recompensa, siempre valdrá la pena creer en la Zona de Promesas.

A la Universidad Industrial de Santander por ser hogar y cuna de una de las mejores etapas de mi vida, por ser fábrica de recuerdos felices.

Cristian Gonzalo Gamba Puentes

Agradecimientos

Agradecer a Dios por permitirme completar ese ciclo académico.

A mi madre por esperar pacientemente la culminación de una nueva etapa en mi vida.

Agradecer al doctor Juan Pablo Flórez Mera, por brindarnos conocimiento, no solo como director, si no como profesor durante la formación del pregrado.

Agradecer inmensamente a AIRON BGA y en especial a Ricardo Moreno, por abrirme las puertas de la empresa, en este lugar he crecido profesionalmente, he aprendido y he desarrollado gran parte de lo visto en la academia.

A la Universidad industrial de Santander, por ser la cuna de conocimiento, donde me forme no solo académicamente si no personalmente.

Le agradezco a mi pareja y a mis amigos por ayudarme y apoyarme en aquellos puntos en donde podía tener fallas.

Y por último agradecerme a mí por nunca desconfiar, por ser perseverante incluso en las adversidades.

Simon Octavio Arias Castro

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Formulación del problema	15
2. Objetivos	16
2.1 Objetivo General	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. Justificación del problema	17
4. Marco teórico	18
4.1 Antecedentes	18
4.1.1 Antecedentes internacionales.....	18
4.2 Definiciones	19
4.2.1 División del agua	19
4.2.1.1 Termólisis directa.....	20
4.2.1.2 Mecanismos cinéticos.	24
4.2.1.3 Catálisis	26
4.2.1.4 Ciclos termoquímicos.	27
4.2.1.4.1 Familia de los óxidos.	28
4.2.1.4.2 Familia de los haluros.	29
4.2.1.4.3 Familia del azufre	29
4.2.1.4.4 Ciclo redox.....	31
4.2.2 Separación de gases	32
4.2.2.1 Separación a baja temperatura.	32

4.2.2.2 Separación a alta temperatura.	33
4.2.3 Termosifón.....	34
4.2.3.1 Reactores.....	34
4.2.3.1.1 Reactor solar de Baykara 2004	34
4.2.3.1.2 Reactor experimental de Thomas 2023.....	35
4.2.3.1.3 Reactor ciclo Cu-Cl.....	37
4.2.3.2 Rango de temperatura	39
4.2.4 Catalizadores.....	40
4.2.5 Aletas	41
4.2.5.1 Aletas de área transversal uniforme	41
4.2.5.2 Aletas con modelo de Kraus	45
4.2.5.3 Aletas tipo “T”	49
4.2.5 Ebullición de película	53
5. Resultados.....	58
5.1 Modelo matemático	58
6. Conclusiones.....	99
Referencias Bibliográficas.....	101
Apéndices.....	104

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Reacción química para cada etapa del ciclo de producción de hidrogeno Cu-Cl</i>	29
Tabla 2 <i>Valores de entrada para pruebas</i>	89
Tabla 3 <i>Resultados de las 4 pruebas</i>	89
Tabla 4 <i>Datos comparativos de los diferentes arreglos del reactor</i>	96

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Fracción molar con vapor puro a 10^6 Pa</i>	22
Figura 2 <i>Fracción molar con vapor puro a 10^5 Pa</i>	23
Figura 3 <i>Disociación del agua a alta temperatura</i>	25
Figura 4 <i>Ciclo sulfuro-yodo de tres pasos</i>	30
Figura 5 <i>Reactor solar</i>	35
Figura 6 <i>Ilustración de reactor tubular</i>	37
Figura 7 <i>Características principales del reactor</i>	39
Figura 8 <i>Aleta circular larga y su variación de temperatura</i>	43
Figura 9 <i>Dimensiones eficiencia aleta rectangular</i>	44
Figura 10 <i>Curvas de diseño óptimo para una aleta longitudinal convectiva-radiante de perfil rectangular</i>	47
Figura 11 <i>Eficiencia de una aleta longitudinal convectiva-radiante de perfil rectangular</i>	48
Figura 12 <i>Aleta de perfil rectangular</i>	49
Figura 13 <i>Aleta en T</i>	50
Figura 14 <i>Ejemplo de geometría tipo piña de pino</i>	53
Figura 15 <i>Curva de ebullición del agua a 1 atm</i>	54
Figura 16 <i>Calculo de combinación de ζ_1 y ζ_2</i>	62
Figura 17 <i>Calculo de la eficiencia mediante ζ_1 y ζ_2</i>	63
Figura 18 <i>Aleta rectangular propuesta</i>	64
Figura 19 <i>Características del mallado para las simulaciones de aletas Kraus y tipo T</i>	65

Figura 20 Respuesta térmica de la aleta propuesta.....	66
Figura 21 Parámetros simulación con fluido.....	67
Figura 22 Respuesta térmica del termosifón sin aletas	68
Figura 23 Grafica temperatura promedio de fluido en reactor sin aletas.....	69
Figura 25 Modelo del termosifón y reactor en arreglo de 12 aletas	70
Figura 26 Respuesta arreglo de 12 aletas Kraus y termosifón.....	71
Figura 27 Grafica temperatura promedio del fluido reactor con 12 aletas (Kraus).....	71
Figura 28 Grafica flujo de calor por aleta - 12 aletas (Kraus)	72
Figura 29 Respuesta arreglo de 8 aletas Kraus y termosifón.....	73
Figura 30 Grafica temperatura promedio reactor con 8 aletas (Kraus)	74
Figura 31 Grafica flujo promedio de calor por aleta - 8 aletas (Kraus).....	75
Figura 32 Respuesta térmica en Aleta propuesta con el modelo de Bejan.....	76
Figura 33 Características de mallado para la simulación de las aletas Kraus y T.....	77
Figura 34 Respuesta arreglo de 8 aletas tipo "T" y termosifón.....	78
Figura 35 Grafica temperatura promedio de fluido reactor con 8 aletas "T"	79
Figura 36 Grafica flujo de calor a pared de aleta - 8 aletas en T.....	80
Figura 37 Combinación de ζ_1 y ζ_2 para segunda rama.....	81
Figura 38 η para segunda rama	82
Figura 39 Isosuperficie a $T_{punta} = 873$ K en la aleta principal sin la corrección de longitud	84
Figura 40 Isosuperficie a $T_{punta} = 873$ K en la rama primaria sin la corrección de longitud	85
Figura 41 Isosuperficie a $T_{punta} = 873$ K con la rama secundaria sin la corrección de longitud	86

Figura 42 <i>Características de mallado para la simulación de las aletas tipo pino</i>	87
Figura 43 <i>Imagen del mallado usado</i>	87
Figura 44 <i>Respuesta térmica del arreglo con $T_b = 1173$ K</i>	88
Figura 45 <i>Respuesta térmica de la prueba #1 (arreglo con $T_b = 700$ K)</i>	90
Figura 46 <i>Respuesta térmica de la prueba #2 (arreglo con $T_b = 900$ K)</i>	91
Figura 47 <i>Respuesta térmica de la prueba #3 (arreglo con $T_b = 1100$ K)</i>	92
Figura 48 <i>Respuesta térmica de la prueba #4 (arreglo con $T_b = 1000$ K)</i>	93
Figura 49 <i>Respuesta térmica reactor con aletas tipo pino</i>	94
Figura 50 <i>Flujo de calor promedio por hilera de aletas en reactor con aletas tipo pino</i>	95
Figura 51 <i>Geometría final del reactor</i>	97

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice a Propiedades del agua saturada	104
Apéndice b Propiedades de gases a 1 atm	105
Apéndice c Ecuaciones para la prueba #1 ($T_b = 700K$ y $T_\infty = 500K$)	105
Apéndice d Ecuaciones para la prueba #2 ($T_b = 900K$ y $T_\infty = 630K$)	107
Apéndice e Ecuaciones para la prueba #3 ($T_b = 1100K$ y $T_\infty = 770K$)	109
Apéndice f Ecuaciones para la prueba #4 ($T_b = 1000K$ y $T_\infty = 700K$)	111

Resumen

Título: Análisis de la transferencia de calor en un proceso de termólisis asistido por un termosifón de sodio *

Autor: Cristian Gonzalo Gamba Puentes, Simón Octavio Arias Castro **

Palabras Clave: Aletas, Termosifón, Transferencia, Temperatura, Calor

Descripción:

Los combustibles fósiles han sido esenciales en el desarrollo energético, pero sus impactos ambientales impulsan la necesidad de una transición hacia energías más limpias y sostenibles. Este trabajo se centra en analizar la transferencia de calor en un proceso de termólisis asistido por un termosifón de sodio empleando una geometría extendida basadas en formas orgánicas que aumente la transferencia de calor y la superficie disponible en comparación con aletas convencionales, pues estas geometrías mejoradas aumentan la superficie disponible y mejoran la eficiencia térmica en comparación con las aletas convencionales. Bajo la dirección del propósito anterior se realiza una revisión que vislumbre un panorama acerca del tema investigado, el cual lleva al hallazgo de diferentes experimentos mediante ciclos termoquímicos y el uso de nuevos reactores o termosifones. Para esto, este trabajo se centró en una aleta tipo “piña de pino”, donde por medio de la adición de ramificaciones incrementa la transferencia de calor gracias al aumento de área, con la limitante del Acero AISI 316 L como un material de baja conductividad.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingeniería fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Juan Pablo Flórez Mera Ph.D. Ingeniería mecánica. Codirector: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Ph.D. Ingeniería química

Abstract

Title: Analysis of heat transfer in a thermolysis process assisted by a sodium thermosyphon *

Author(s): Cristian Gonzalo Gamba Puentes, Simón Octavio Arias Castro **

Key Words: Fins, Thermosyphon, Thermosyphon, Transfer, Temperature, Heat

Description:

Fossil fuels have been essential in energy development, but their environmental impacts drive the need for a transition to cleaner and more sustainable energies. This work focuses on analyzing heat transfer in a sodium thermosyphon assisted thermolysis process using an extended geometry based on organic shapes that increases heat transfer and available surface area compared to conventional fins, as these improved geometries increase the surface area of the fins.

These improved geometries increase the available surface area and improve thermal efficiency compared to conventional fins. Under the direction of the previous purpose, a review is carried out to provide an overview of the investigated topic, which leads to the finding of different experiments by means of thermochemical cycles and the use of new reactors or thermosyphons. For this, this work was focused on a “pine cone” type fin, where by means of the addition of ramifications the heat transfer increases thanks to the increase of area, with the limitation of the AISI 316 L steel as a low conductivity material.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Juan Pablo Flórez Mera Ph.D. Mechanical Engineering. Co-director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Ph.D. Chemical Engineering

1. Formulación del problema

Los combustibles fósiles han sido una fuente clave de energía y materia prima en la sociedad actual, sin embargo, su utilización tiene implicaciones ambientales y sociales significativas. La extracción, producción y consumo de estos contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes del aire. La migración a energías limpias propone un desafío por el coste en la implementación de nuevas alternativas y lo ambientalmente viable que pueden llegar a ser.

El hidrógeno se ha adentrado en el panel de posibilidades en la última década, siendo el gas más abundante en el universo y posible de encontrar en el agua, en la atmósfera del planeta y en los hidrocarburos, pero su implementación a gran escala se ha visto truncada por la baja eficiencia y altos costos de los métodos existentes para extraerlo.

La termólisis es un método para obtener hidrógeno con bajo impacto medioambiental, que permite extraer el hidrógeno del agua mediante reacciones químicas a altas temperaturas, aunque uno de los grandes retos es garantizar una transferencia de calor eficaz en la temperatura necesaria para activar la reacción. Normalmente las temperaturas pueden llegar a los 2700 °C, “que es donde el 36% de enlaces se rompen” (Piqué, 2010, p 51). Por lo tanto, actualmente existen el desafío tecnológico de desarrollar superficies mejoradas que favorezcan la transferencia de calor a alta temperatura y sean compatibles con tecnologías para la utilización de energía solar de alta temperatura como el termosifón operando con metales líquidos. Formas optimizadas para este fin deben ser estudiadas y modeladas.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar la transferencia de calor en un proceso de termólisis asistido por un termosifón de sodio empleando una geometría extendida basadas en formas orgánicas que aumente la transferencia de calor y la superficie disponible en comparación con aletas convencionales.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar las condiciones térmicas de operación de un reactor en un proceso de termólisis consultando literatura previa que provea parámetros estudiados anteriormente usándolos como punto de partida.

Proponer una geometría de superficie extendida basada en aletas con formas orgánicas acopladas a un termosifón de sodio operando en las condiciones térmicas de un proceso de termólisis.

Realizar una simulación numérica de la transferencia de calor utilizando un software especializado para obtener una aproximación de la respuesta térmica de la geométrica propuesta.

Comparar la transferencia de calor y área disponible de las aletas analizadas con aletas convencionales operando en las mismas condiciones de contorno.

3. Justificación del problema

En este trabajo se busca un estudio de simulación numérica para analizar la respuesta de un arreglo de aletas y mejorar la transferencia de calor maximizando el área de contacto. Para ello, se busca aplicar un PCM (sodio) en un termosifón como sistema de transferencia de calor hacia la configuración de aletas que, a su vez, estarán en contacto con sustancia a dividir, ya sean hidrocarburos o agua.

Un termosifón es un intercambiador de calor que funciona a partir del cambio de fase de un fluido de trabajo, formado por un tubo hueco que contiene en su interior dicho fluido con un extremo inferior que recibe calor de una fuente térmica produciendo la evaporación de este. El vapor producido fluye desde el evaporador hasta su extremo superior donde el calor es rechazado produciendo la condensación, así pues, el condensado retorna al evaporador por acción de la fuerza de gravedad manteniendo el ciclo de funcionamiento. Para altas temperaturas, son utilizados metales líquidos como el sodio y el potasio. El condensador del termosifón transfiere la energía a través de convección natural, esto permite una transferencia de calor eficiente entre las diferentes partes del sistema. El mejoramiento del sistema de transferencia de calor también incrementa la eficiencia de la reacción de termólisis y reduce los requerimientos energéticos. Por tal razón, en este trabajo será propuesta una distribución de aletas que permitan mejorar la transferencia de calor y aumente, a su vez, el área disponible para el catalizador. A través de una simulación numérica será evaluada la respuesta térmica de la distribución propuesta.

4. Marco teórico

4.1 Antecedentes

Al realizar el rastreo previo de los antecedentes investigativos, se evidencia la poca o nula existencia de trabajos afines a la investigación en curso, pues las geometrías no convencionales son un campo no explorado a nivel nacional, siendo las más comunes aquellas presentes en los libros académicos tales como el *Transferencia de calor y masa* de Cengel o *Fundamentos de transferencia de calor* de Incropera; ampliando el panorama investigativo, se obtiene el hallazgo del libro titulado *Shape and Structure, From Engineering to Nature* publicado en el año 2000.

4.1.1 Antecedentes internacionales

En la última década, uno de los temas de interés en la ingeniería térmica y energética ha sido el estudio de tecnologías más eficientes en la transferencia de calor, entre estas se resalta la mejora en las aletas o superficies extendidas, donde se busca maximizar la conducción térmica global variando diferentes parámetros. Bejan y Almogbel (1999) desarrollaron la base para poder mejorar una aleta en forma de T, esto se logra minimizando la resistencia global sujeta a restricciones de tamaño. Este método se ha reflejado en sistemas donde hay medios porosos con un alto flujo de fluido a través de ellos. (Bejan & Almogbel, 2000). Toda esta información a su vez se encuentra recogida en el libro *Shape and Structure, From Engineering to Nature*, este mismo, recopila el estudio de diferentes metodologías expuestas en varios artículos científicos.

La energía solar se ha producido en energías renovables, como el avance en la producción de hidrógeno limpio mediante la termólisis directa del agua, un proceso que utiliza energía solar

concentrada para disociar la molécula del agua, el inicio de la investigación sobre el proceso se remonta a la década pasada, y la década de 1970 empezaría a su auge. Sin embargo, este proceso cuenta con una gran limitante, que son las altas temperaturas requeridas, las cuales ascienden a más de 2000 K.

Buscando una solución a este inconveniente, se han realizado diferentes experimentos mediante ciclos termoquímicos y el uso de nuevos reactores o termosifones, los primeros pasos de esta investigación se remontan a Odeillo, Francia, donde se utilizaron reactores solares para el estudio, los últimos avances se presentan en Montreal, Canadá, donde se siguen buscando diferentes diseños de reactores y separación de gases para mejorar las tasas de conversión y la eficiencia térmica (Baykara, 2004)

4.2 Definiciones

4.2.1 División del agua

La descomposición térmica del agua es uno de los procesos químicos más atractivos para la obtención de hidrógeno. Existen varias formas de romper la molécula de agua, pero estas deben asegurar la menor recombinación de los productos de la reacción.

En la actualidad se han estudiado diversos métodos para la descomposición del agua, mediante energía térmica, estos contemplan dos tipos de procesos principalmente:

- Termólisis directa
- Ciclos termoquímicos

4.2.1.1 Termólisis directa.

La termólisis es un proceso químico para la obtención de hidrógeno a partir del agua usando calor, en el cual un compuesto se separa en dos o más compuestos. (López, 2015) Con este se aprovecha la energía térmica para descomponer las moléculas de agua, la finalidad es generar una energía limpia basada en el hidrógeno.

De manera directa, este proceso funciona en torno a los 2500 K, a su vez se usan series de ciclos termoquímicos, que son reacciones químicas que permiten bajar la temperatura final del proceso. (Aporta et al. 2011)

En este enfoque el objetivo es aprovechar la disociación del agua que ocurre a alta temperatura, mientras se intenta evitar las reacciones de recombinación entre el hidrógeno y el oxígeno evolucionados. Lamentablemente, la disociación significativa del vapor de agua solo es posible a temperaturas extremadamente altas, en el rango de 2000-3000K, un ejemplo de esto es la cantidad de agua que se descompone a 2300 K, en esta temperatura, solo el 4% del agua es descompuesta a presión atmosférica. (Lede et al., 1982)

En los experimentos, se cree que la disociación ocurre al entrar en contacto el vapor de agua con una superficie sólida caliente. El mecanismo de la reacción no se comprende completamente. En la mayoría de los casos, incluso en aquellos donde ocurre una disociación significativa del agua, no se logra o se altera el equilibrio termodinámico debido a la eliminación de uno o más de los productos generados durante la disociación. (Baykara, 2004)

Para este proceso se requieren dos condiciones: el agua debe calentarse a una temperatura muy alta, más de 2000K, en poco tiempo y, después de la disociación, los productos deben

enfriarse muy rápidamente para evitar la recombinación de las especies activas de vuelta al agua (“DIRECT THERMAL DECOMPOSITION OF WATER,” 1979).

Según estudios clásicos de termodinámica, solo seis componentes existen en una medida significativa en vapor disociado en el rango de 2000-3000K; estos son H₂O, OH, H, H₂, O y O₂. Otros compuestos como HO₂, O₃ y H₂O₂ pueden ser despreciados (“DIRECT THERMAL DECOMPOSITION OF WATER,” 1979).

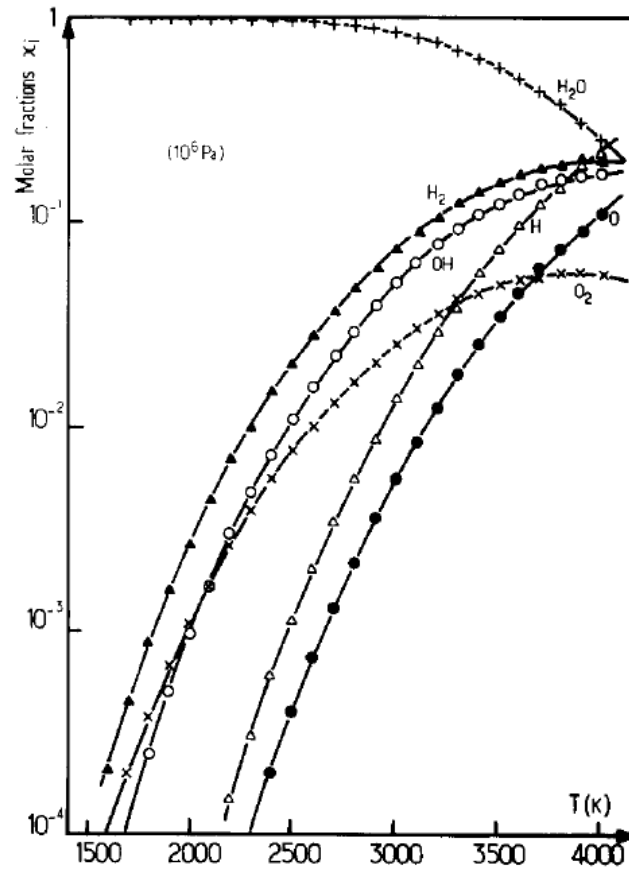
Dado que el agua (H₂O) incluso en temperaturas altas (mayor a 2000 K) tiene una baja tasa de disociación y las reacciones que ocurren son reversibles es crucial conservar el poco gas generado durante el proceso (su fracción molar está en el rango de 10⁻³ a 10⁻² bajo presión atmosférica y temperaturas entre 2000 y 2500 K), por esta razón se busca enfriar rápida y eficientemente los productos de la reacción (Baykara, 2004).

Se puede generar un aprovechamiento del 90% de los gases diluidos usando un enfriamiento rápido 10⁵-10⁶ K/s, teniendo contacto directo con el gas frío en chorro en cuestión de milisegundos, el gas auxiliar inyectado debe estar en una temperatura en los rangos de 400-450K. Cuando el enfriamiento se hace directo sin usar una disolución se puede perder hasta el 60 % del hidrogeno disociado en la reacción (Baykara, 2004).

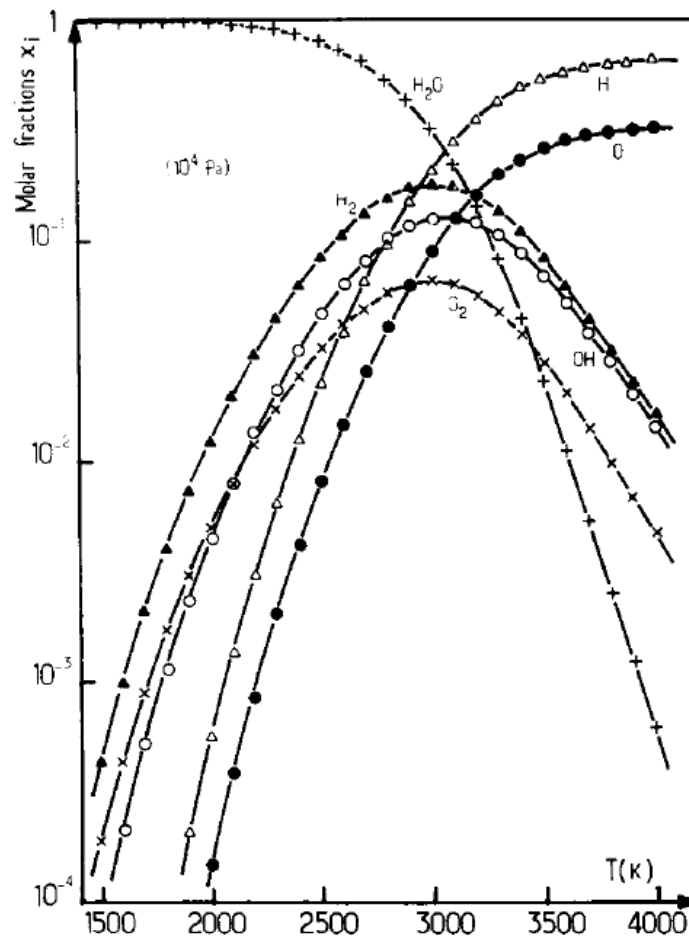
En las Figuras 1 y 2 se presentan datos recopilados el siglo pasado al inicio de las investigaciones de este proceso.

Figura 1

Fracción molar con vapor puro a 10^6 Pa



Nota. El gráfico representa la fracción molar de diferentes especies ya disociadas, siendo el eje horizontal la temperatura y el vertical la fracción. Tomado de (Lede et al., 1982, p.2)

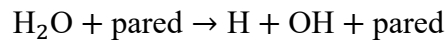
Figura 2 Fracción molar con vapor puro a 10^5 Pa

Nota. El gráfico representa la fracción molar de diferentes especies ya disociadas, siendo el eje horizontal la temperatura y el vertical la fracción. Tomado de (Lede et al., 1982, p.2)

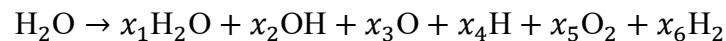
Los datos evidenciados en las gráficas anteriores denotan la gran diferencia que marca la presión a la cual se lleva a cabo el proceso, con presiones inferiores a la atmosférica permite la ebullición del agua de manera más rápida, permitiendo una disociación de las moléculas en el vapor, incluso a los 1500 K.

4.2.1.2 Mecanismos cinéticos.

En estudios cinéticos experimentales llevados a cabo en condiciones de no equilibrio termodinámico y sin uso de energía termosolar para los rangos de temperatura de interés, la disociación del agua puede ser descrita por diferentes mecanismos dependiendo del nivel de temperatura, el cambio en el mecanismo se produce alrededor de 1900 K. En el rango de temperatura de 1700–1900 K, parece dominar un mecanismo heterogéneo que involucra una reacción disociativa de primer orden localizada en la pared calentada en el reactor. (Baykara, 2004)



Se estimaron valores del coeficiente de disociación (probabilidad de reacción por colisión) para esta reacción en el rango de 5×10^7 y 5×10^6 , que están de acuerdo con los valores obtenidos durante la descomposición catalítica del agua en Pt (Jellinek & Kachi, 1984) dentro de un rango de temperatura de 1573–1675 K, sin utilizar energía solar. Tras alcanzar entre 2000 y 300K se puede considerar un mecanismo homogéneo, donde hay H₂O, OH, H, O, H₂ y O₂. (Baykara, 2004) Basadas en datos cinéticos y termodinámicos. La reacción general se puede expresar de la siguiente manera:



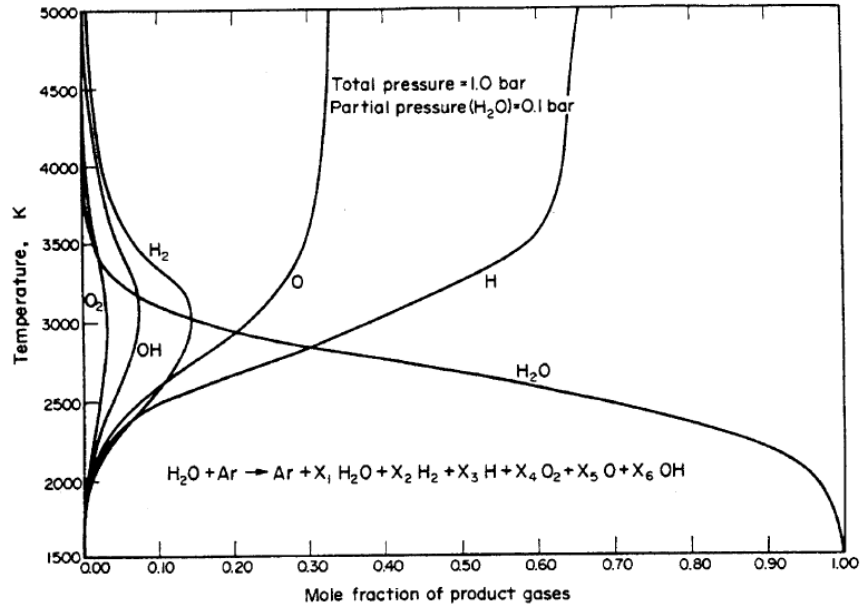
Asumiendo un reactor isotérmico perfectamente mezclado, se estimaron los valores de tiempo de residencia necesarios para alcanzar aproximadamente el 90% de las concentraciones de equilibrio como 10^{-2} , 10^{-3} y 10^{-4} s para 2200, 2500 y 3000 K. Se alcanzaron condiciones de equilibrio durante experimentos solares donde el agua se disoció a 2500 K y 1 atm, y se utilizó vapor para el enfriamiento rápido. Los mecanismos de reacción no presentan restricciones en cuanto a las reacciones inversas. A medida que aumenta la temperatura (y/o disminuye la presión),

se favorece la disociación. La recombinación de las especies solo ocurre cuando la mezcla reactiva se enfría de manera gradual. (Baykara, 2004)

La cantidad de disociación del agua aumenta en dos casos, al aumentar la temperatura y cuando se reduce la presión en la zona de reacción. Una vez ocurre este proceso, se tiene dos opciones para determinar la composición del vapor disociado en función de la temperatura y la presión, el primero es asumir un conjunto de equilibrios químicos, o en su defecto minimizar la entalpía libre de la mezcla reactiva. (Baykara, 2004)

Figura 3

Disociación del agua a alta temperatura



Nota. La grafica presenta los diferentes compuestos y sus fracciones molares obtenidas al realizar un aumento de temperatura. (Bilgen et al., 1977, p.3)

Como se ha visto con antelación que la producción de H_2 representa solo una pequeña fracción de los gases generados. Para incrementar ese porcentaje, una posible estrategia es reducir la presión parcial del H_2O , por ejemplo, introduciendo un gas inerte (Bilgen et al., 1977). Se observa que la introducción de un gas inerte aumenta la producción de hidrógeno a niveles más aceptables dentro del rango de temperaturas deseado. Las especies H, OH y O presentes en los gases producidos no pueden enfriarse hasta la temperatura ambiente. Por tanto, hay que investigar técnicas para enfriar estas especies a más altas temperaturas, para evitar problemas asociados con su recombinación o comportamiento inestable a temperaturas más bajas.

Los experimentos que se han realizado rondan en torno a los 2000 a 2500°C, en estos mismos se ha apreciado la formación de una pequeña cantidad de HE, en un orden el 2 al 3% del total de los gases, teóricamente, se esperaba el doble de producción. La baja eficiencia del reactor es un factor de influencia en esta baja producción. (Bilgen et al., 1977)

4.2.1.3 Catálisis.

Debido a las limitaciones de los materiales actuales, la catálisis de la reacción puede ser una opción viable para reducir la temperatura de operación. Sin embargo, solo un estudio que se asemeja más a la electrocatálisis que a la termólisis se ha realizado hasta ahora (Jellinek & Kachi, 1984). En ese estudio, que no estaba relacionado con la energía solar, se utilizaron alambres metálicos para realizar la descomposición térmica catalítica del agua y se observó la liberación de hidrógeno a temperaturas superficiales tan bajas como 1600 K. Debido a la presencia del catalizador en este caso, la baja magnitud de la descomposición se compensa por una mayor velocidad de reacción.

La aparición del "efecto de pared" dentro del mecanismo cinético se ve favorecida por superficies cerámicas calientes (con puntos de fusión superiores a los de la mayoría de los metales de transición utilizados como catalizadores) en la zona de reacción, como en el caso de las membranas; solo a temperaturas más bajas se produce este efecto. Sin embargo, las opciones de catálisis convencionales se vuelven altamente imprácticas e incluso inviables a temperaturas más altas, que son necesarias para una mayor conversión, junto con las limitaciones de espacio y los requisitos de orientación impuestos por el uso directo de energía solar concentrada. (Baykara, 2004).

4.2.1.4 Ciclos termoquímicos.

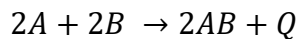
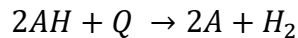
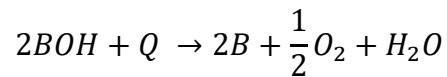
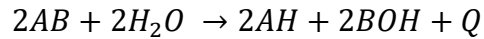
Los ciclos termoquímicos de la separación del agua o TWSC por sus siglas en inglés son una serie de reacciones químicas que ocurren en un bucle cerrado, con el fin de reducir el aporte de energía necesario para la obtención del hidrógeno (CIC energi GUNE, 2022).

Según la literatura se han propuesto unos 300 ciclos, pero solo unos cuantos se han investigado a fondo, esta idea se afianza con el aporte de Brown (2003), que da los diferentes criterios a considerar para la viabilidad de estos procesos, se encuentran la cantidad de reacciones, la cantidad de elementos a intervenir y los demás aspectos económicos y de viabilidad para la implementación de estos.

Ya en países como España o Estados Unidos algunas empresas u organizaciones han realizado el estudio de un par de ciclos termoquímicos para ver los resultados a media o gran escala. En primer lugar, la empresa ingeniería Empresarios Agrupados desarrolló el proyecto HYTHEC (Hydrogen Thermochemical Cycles) y, en segundo lugar, el departamento de Energía

de Estados Unidos (DOE), el cual posee un programa llamado Nuclear Hydrogen Initiative (NHI). En ambos casos se ha estudiado el ciclo yodo-azufre y el ciclo híbrido de hidrógeno.

La forma de clasificar los ciclos depende de cual especie participe en las reacciones químicas, dichas reacciones son las siguientes:



En esas reacciones Q simboliza el calor entregado u obtenido durante el proceso, A y B son los compuestos a reaccionar. Dichos compuestos son regenerativos. (Aporta et al. 2011) Se va a nombrar las diferentes familias presentes en los ciclos

4.2.1.4.1 Familia de los óxidos.

En esta familia se utilizan los óxidos metálicos donde se pueden utilizar los reactivos tales como Mn, Fe y Co según la disponibilidad. A continuación, se aborda el oxiclórico de cobre por ser uno de los ciclos más estudiados.

Oxicloruro de cobre. La termólisis del oxiclórico de cobre es la etapa de reacción a mayor temperatura en el ciclo cobre-cloro, en la cual se descompone para formar cloruro cúprico y oxígeno gaseoso como productos finales. (Thomas et al., 2023)

En el reactor de hidrólisis, la producción de CuO ayuda a facilitar la separación del oxígeno del vapor y del HCl en estado gaseoso a temperaturas de 340°C a 400°C. Después del reactor, la mezcla de HCl y el vapor se condensa para posteriormente ser reutilizado en el paso de

electrólisis. Se investigó experimentalmente la descomposición de CuOCuCl_2 utilizando una mezcla de CuO y CuCl_2 con el objetivo era producir CuCl y O_2 gaseoso (Wajda & Gabriel, 2019).

Tabla 1

Reacción química para cada etapa del ciclo de producción de hidrogeno Cu-Cl

Etapa	Reacción Química	Rango de Temperatura
Electrólisis	$2\text{CuCl}(\text{aq}) + 2\text{HCl}(\text{aq}) + \text{V} \rightarrow 2\text{CuCl}(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g})$	30-90 °C
Hidrólisis	$2\text{CuCl}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{Q} \rightarrow \text{CuOCuCl}_2(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{g})$	340-400 °C
Termólisis	$\text{Q} + \text{CuOCuCl}_2(\text{s}) \rightarrow 2\text{CuCl}(\text{fundido}) + 1/2\text{O}_2(\text{g})$	500-530 °C

Nota. Reacción química junto con las temperaturas de operación para cada proceso de obtención de hidrogeno. Tomado de (Wajda & Gabriel, 2019, p.3)

4.2.1.4.2 Familia de los haluros.

Se encuentran presentes los reactivos tales como Mn o Fe según el caso, Cl, Br o I y en la reacción de producción del oxígeno se encuentra Mn o Ca y Cl o Br.

4.2.1.4.3 Familia del azufre

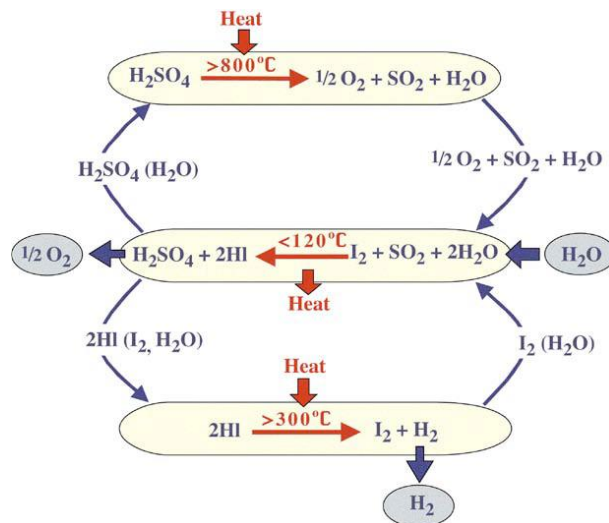
Este vendría a ser uno de los ciclos más estudiado, consta de 4 ciclos principales, el primero conocido como el cuatro pasos, el segundo que se compone de yodo-azufre, el tercero siendo

únicamente de sulfato y, por último, el ciclo compuesto por ácido sulfúrico y etanol (Aporta et al. 2011). Como se puede observar previamente el más estudiado y desarrollado es el de yodo-azufre.

Ciclo sulfuro-yodo. Es un ciclo de tres pasos que lleva desarrollándose desde 1973. La investigación y desarrollo del ciclo sulfuro-yodo fue patrocinada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE NE) a través de su iniciativa de Hidrógeno Nuclear. Este ciclo fue elegido para integrarse con la energía solar porque su temperatura máxima es compatible con el funcionamiento de torres de energía solar avanzadas y ha sido demostrado a escala de laboratorio (ILS), pero aún no ha tenido éxito en operaciones a mayor escala.

Figura 4

Ciclo sulfuro-yodo de tres pasos



Nota. Tomado de Solar Thermochemical Hydrogen Production Research (STCH) (p.35)

por Robert Perret, 2011

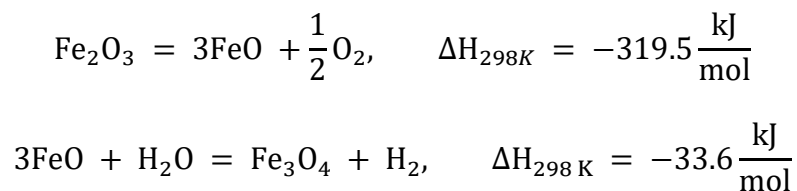
El ácido sulfúrico concentrado se reduce en el reactor de descomposición térmica. Se libera oxígeno, y en la reacción de Bunsen, el SO₂ acuoso forma ácido sulfúrico y ácido yodhídrico (HI). Las densidades específicas de estos compuestos son lo suficientemente diferentes como para que un proceso gravimétrico sea posible para separarlos. El ácido sulfúrico se concentra y se recicla al reactor de descomposición mientras que el HI se destila para liberar hidrógeno y el yodo se reutiliza en el ciclo (Perret, 2011).

Se eligió un receptor de partículas sólidas para proporcionar calor térmico solar a través del ciclo sulfuro-yodo. Según el diseño conceptual, el flujo solar directo debería calentar un medio térmico particulado a una temperatura de alrededor de 1000°C, y luego debería almacenarse para su uso posterior en un reactor de descomposición térmica (Perret, 2011).

1. Sección de reacción de Bunsen: $I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HI + H_2SO_4$ (T ~ 120°C)
2. Sección de descomposición ácida: $H_2SO_4 \rightarrow SO_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2$ (T > 800°C)
3. HI Sección de descomposición: $2HI \rightarrow I_2 + H_2$ (T > 350°C)

4.2.1.4.4 Ciclo redox.

Un ciclo termoquímico de descomposición del agua en dos pasos utilizando el par redox de óxido metálico Fe₃O₄/FeO fue propuesto originalmente por (Nakamura, 1977); este ciclo procede de la siguiente manera:



Para favorecer termodinámicamente la reducción térmica de Fe_3O_4 a FeO , se han examinado soluciones sólidas entre el sistema redox $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ y $\text{M}_3\text{O}_4/\text{MO}$ (M denota Mn o Co) utilizando un enfoque que implica la posibilidad de combinar el alto rendimiento de H_2 en el sistema $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ con la alta reducción en el sistema $\text{M}_3\text{O}_4/\text{MO}$. Es posible formar óxidos metálicos mixtos $(\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x)_3\text{O}_4$ o ferritas mediante la sustitución parcial del hierro en Fe_3O_4 con Mn, Co, o Mg. El óxido mixto puede ser más reducible que Fe_3O_4 , mientras que la fase reducida $(\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{O}_3$ todavía es capaz de sufrir una reacción de hidrólisis (Kodama et al., 2008).

4.2.2 Separación de gases

La separación de gases resultantes de la termólisis debe hacerse antes de que ocurra una recombinación del hidrógeno y el oxígeno, esta separación es un aspecto importante ya sea en el diseño del reactor o en el tratamiento del gas generado.

4.2.2.1 Separación a baja temperatura.

Debido a la importancia de la temperatura en el mecanismo de termólisis del agua y teniendo en cuenta que es reversible, se puede evitar la recombinación del oxígeno es posible con un enfriamiento rápido del gas generado, esta disminución debe hacerse de manera brusca en un tiempo corto. Este proceso se conoce como “temple” y puede hacerse con equipos interno o externos al reactor, y debe hacerse con una disminución de 1500 a 2000K en varios milisegundos, luego de eso la separación del hidrogeno se puede hacer en un siguiente paso mediante otros métodos (Baykara, 2004).

4.2.2.2 Separación a alta temperatura.

La eliminación continua de uno de los productos facilita la termólisis por tanto reduce el riesgo de recombinación al alterar la estequiometría de la mezcla, esta separación se puede realizar in situ dentro del mismo reactor con métodos especiales de membrana, chorro supersónico de gas o centrifugación (Baykara, 2004).

- En las membranas, los óxidos refractarios como CaO , CeO_2 , Y_2O_3 y ZrO_2 tienen conductividades eléctricas mixtas y características electrónicas e iónicas como resultado de la combinación de enlaces covalentes e iónicos presentes en estos sólidos. Una membrana semipermeable se puede colocar en un gradiente de potencial químico para el oxígeno para eliminar el oxígeno. Con componentes iónicos y electrónicos de magnitudes similares, esta membrana debe tener una conductividad eléctrica mixta. A temperaturas entre 1800 y 2300 K, las membranas son semipermeables (Baykara, 2004).
- En el caso de la centrifugación para realizar la separación de una especie (como el hidrógeno) de la mezcla reactiva durante la termólisis de H_2O , si la mezcla de gases de masas molares difíciles se rota en un recipiente cilíndrico con una cierta velocidad angular, la velocidad de rotación del gas en la periferia del recipiente debe ser del mismo orden o mayor que la velocidad térmica de las moléculas de H_2O . Este proceso ya se ha empleado en la separación de isótopos.

4.2.3 Termosifón

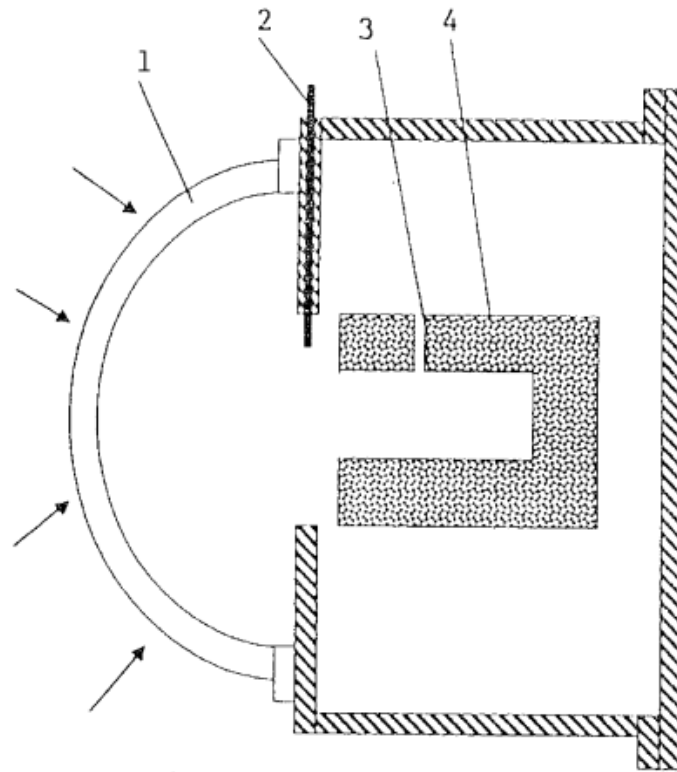
Un termosifón bifásico es un dispositivo pasivo que permite la transferencia de calor hasta 1000 veces más rápida que a través de metal sólido. Es un intercambiador de calor que usa el cambio de fase de un fluido de trabajo para transportar energía térmica; formado por un tubo hueco que contiene en su interior un fluido que al recibir el calor en su parte inferior (evaporador) produce el cambio de fase a vapor; fluye de la región inferior a la superior (condensador) donde el calor se rechaza produciendo la condensación del fluido. El condensado retorna al evaporador nuevamente por acción de la fuerza de gravedad. La geometría de los termosifones suele ser cilíndrica para soportar las presiones a la que se someten y se colocan en arreglos de tubos verticales.

4.2.3.1 Reactores

Se van a dar algunos reactores estudiados en diferentes procesos, para esto se realiza la siguiente aclaración, pues estos pueden o no tener un nombre asignado durante el experimento.

4.2.3.1.1 Reactor solar de Baykara 2004

Se han llevado a cabo experimentos a presiones subatmosféricas y el hidrógeno se separa durante la termólisis utilizando un medio microporoso dentro del reactor a la temperatura de reacción. En el resto de los experimentos, los gases del producto se enfriaron de alguna manera después de la descomposición térmica directa en un solo paso, en estos casos, la pérdida de hidrógeno por recombinación ya no es un problema importante. “A pesar de todos los esfuerzos, la eficiencia termodinámica determinada experimentalmente para todos los tipos de diseños es bastante baja, el valor para los experimentos con enfriamiento apenas supera el 1% y el valor máximo de la fracción molar de hidrógeno es 0.03” (Baykara, 2004, p.7).

Figura 5*Reactor solar*

Nota. Los componentes del reactor, los cuales se cuentan enumerados son, 1, ventana de pyrex; 2, tubo para enfriamiento (material de silicio); 3, alimentación de agua y por último; 4, ladrillos que funcionan como aislante. Tomado *Experimental solar water thermolysis. International Journal of Hydrogen Energy*, 29(14), 1459–1469. Por S.Z. Baykara (2004)

4.2.3.1.2 Reactor experimental de Thomas 2023

En los experimentos de este reactor se han utilizado CuCl_2 y CuO de calidad analítica (>98%) (Thomas et al., 2023). Se usó nitrógeno de alta pureza (debe ser mayor al 99,99%) que funciona como gas de purga.

El CuO y el CuCl₂ se precalentaron para eliminar la humedad antes de cargarlos en el reactor. Todos los experimentos se llevaron a cabo utilizando una mezcla equimolar de CuOeCuCl₂ (equivalente a 1 mol de Cu₂OCl₂) como reactivo según estudios previos de confirmando que bajo condiciones idénticas se obtienen conversiones similares, teñido con Cu₂OCl₂ y mezcla equimolar de CuO-CuCl₂ (Thomas et al., 2023, p.3).

Para este reactor se han realizado experimentos utilizando tres diferentes reactores tubulares de diámetro de 25 mm, 50 mm y 100 mm de diámetro y 800 mm de altura.

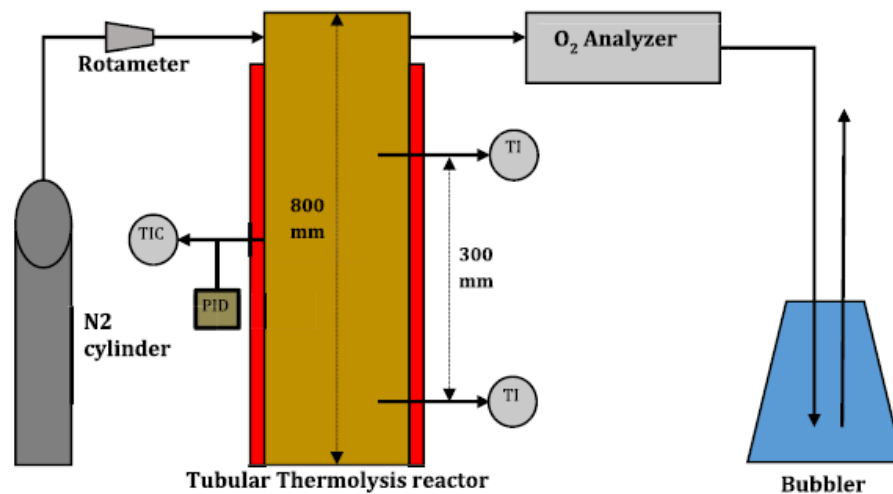
El calor al reactor se suministró utilizando un calentador de resistencia eléctrica. Las temperaturas de la superficie del reactor (TIC), las secciones superior e inferior del reactor (TI) se midieron utilizando termopares tipo K. El calentador se controla utilizando un controlador PID basado en la retroalimentación de temperatura del termopar colocado en la superficie del reactor (Thomas et al., 2023, p.4).

El experimento fue desarrollado en diferentes ocasiones con el fin de obtener un rango de resultados, entre ellos se obtiene una diferencia de temperatura de ± 5 °C entre la parte superior e inferior del reactor. Al comienzo del experimento, el gas de nitrógeno N₂ se utiliza para purgar completamente el reactor hasta que la concentración de oxígeno diatómico O₂ dentro del reactor se vuelve cero. Durante los experimentos, el flujo de barrido de N₂ en la parte superior del reactor se mantuvo a 2 slpm utilizando un rotámetro. La concentración de oxígeno del producto en la

corriente de gas de salida se analiza utilizando un analizador de oxígeno en línea (PCI Analytics) con una tasa de muestreo de 1 s. El oxígeno total evolucionado se calcula integrando la tasa de generación de oxígeno contra el tiempo con una precisión de $\pm 1\%$ (Thomas et al., 2023).

Figura 6

Ilustración de reactor tubular



Nota. Tomado de *Heat transfer characteristics and design aspects of thermolysis reactor in copper-chlorine thermochemical water splitting cycle.* (p. 4), por (Thomas et al., 2023)

4.2.3.1.3 Reactor ciclo Cu-Cl

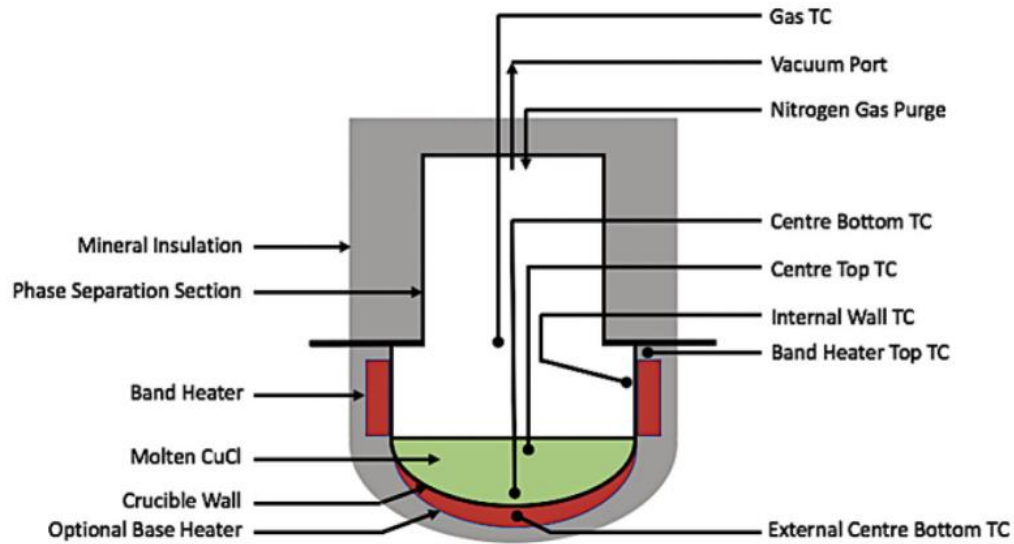
Desarrollado por Wajda y Gabriel (2019) se buscó un modelo piloto para estudio de un reactor en un proceso de termólisis. El fluido a termolizar es $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2$, este produce CuCl y O_2 , la relación de O_2 es directamente proporcional a la cantidad de material que ingresa a la reacción (Wajda & Gabriel, 2019).

En este proceso endotérmico, que requiere alrededor de 530 °C, el reactor se calienta externamente mientras ocurre la reacción de descomposición dentro. Se instalaron dos calentadores en el crisol para el experimento que se desarrolló: un calentador de banda en el perímetro de la sección cilíndrica y una cinta de calentamiento en la base abovedada. Se colocó un calentador de banda cerámica de 1300W (MPI Inc.) fuera del crisol y se enrolló una cinta de calentamiento de 627W (Omega STH051-080) en la parte inferior de la base del reactor (Wajda & Gabriel, 2019).

Se procede a agregar una muestra de 2Kg, se aisló todo el sistema con capas de lana mineral de 1" de espesor, a su vez, se realiza una purga con N₂ antes de la prueba; el sistema fue puesto en marcha y se probaron dos escenarios de calentamiento: fuentes de calentamiento únicas y dobles. El calentador de banda funcionaba con un punto de ajuste de 650 °C con una sola fuente de calentamiento. En las pruebas con dos fuentes de calor, los calentadores de banda y enrollados se configuraron para alcanzar una temperatura de 650 °C.

Figura 7

Características principales del reactor



Nota. Tomado de *Thermolysis reactor scale-up for pilot scale CuCl hybrid hydrogen production* (p. 4), por (Wajda & Gabriel, 2019)

4.2.3.2 Rango de temperatura

Este tipo de tubo de calor puede manejar diferentes rangos de temperaturas, esto se debe a la variación de trabajos que pueden cumplir los termosifones. Un ejemplo básico de este es el calentamiento del agua para un hogar, ya sea por una fuente de calor externa como el sol o una fuente de calor interna dentro del termosifón.

A su vez, la temperatura a trabajar va a influir de manera directa en la construcción del tubo de calor, por ello se debe tener muy claro las condiciones del fluido, los rangos de trabajo, como dice Aguas (2015), los rangos de temperatura van desde casi el cero absoluto hasta

temperaturas que superan los 1600 °C, dichas temperaturas se encuentran en sustancias como los metales líquidos los cuales tienen un punto de ebullición bastante alto.

Según el rango de temperatura, se agrupan diferentes tubos de calor en los que se tienen los criogénicos, que comprenderán de los 4 K a los 200 K, los de baja temperatura de los 200 K a los 550 K, los de media temperatura van a operar de los 550 K a los 750 K y, por último, los de alta temperatura van a todos los fluidos de trabajo que superan los 750 K.

4.2.4 Catalizadores

Un catalizador es una sustancia o elemento agregado en una superficie o reacción para aumentar la velocidad del proceso, la idea de que no se consuman durante la reacción para reutilizarse.

El modo de reducción tiene que ver con el que se necesita menos energía para iniciar la reacción, algunos de los catalizadores más usados tienen una base de óxido, estos pueden ser óxido de zinc, de magnesio, de nítrico y de zirconio. Otras opciones viables son las sales de metales alcalinos donde se encuentra el carbonato de sodio el cual trabaja muy bien a altas temperaturas, metales de transición tales como el níquel o el paladio, y, por último, los carburos metálicos que trabajan muy bien a altas temperaturas, pero con un costo de obtención demasiado alto (Rashid et al., 2015). El modo de aplicación varía según el caso, los utilizados son catalizadores homogéneos y heterogéneos, los primeros son disueltos en la sustancia a ser termolizada, mientras que los heterogéneos como el paladio son presentados en partículas sólidas las cuales estarán en contacto con el fluido. En la superficie de las aletas actúa como una capa intermedia entre el agua y las aletas.

4.2.5 Aletas

En la transferencia de calor se busca ampliar el área de contacto entre el área caliente y el fluido al cual se pretende entregar dicha energía. La forma más eficaz de ampliar esta área son las aletas, el uso de estas genera, a su vez, un mayor contacto con la superficie caliente generando una mejor distribución del calor.

4.2.5.1 Aletas de área transversal uniforme

El modelo de aleta adoptado en el análisis considera una aleta *Infinitamente Larga*, donde se espera la punta de aleta tenga la temperatura del fluido cercana a los 900 °C.

Además, como primera instancia se tendrá una *Sección transversal circular uniforme*, teniendo un área transversal A_c constante y un área superficial $A_s = Px$ donde P será el perímetro de la forma de la sección transversal de la aleta y este caso circular, y x será la distancia medida desde la base de la aleta.

Con ello tendríamos las definiciones para las condiciones de frontera con un *exceso de temperatura*:

$\theta(L) = T(L) - T_\infty = 0$	(1)
-----------------------------------	-----

Esto teniendo en cuenta que $L \rightarrow \infty$ y en la punta de la aleta teniendo una temperatura cercana o igual a la del medio en este caso cercana a los 900 °C.

Por tanto, en la base se tendrá:

$\theta_b = T_b - T_\infty$	(2)
-----------------------------	-----

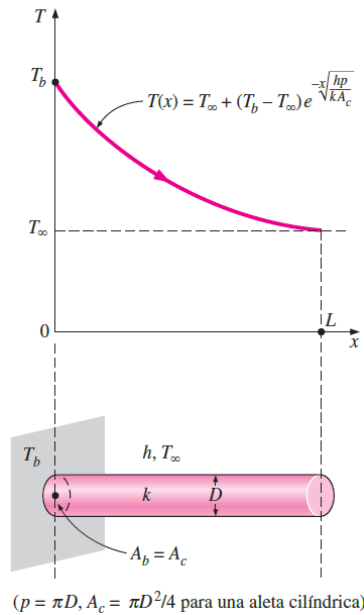
Definiendo el exceso de temperatura:

$\theta(x) = T(x) - T_\infty$	(3)
-------------------------------	-----

Que aplicará para cualquier punto x a lo largo de la aleta cilíndrica. Lo que permitirá la comparación de los gradientes de temperatura a lo largo de las aletas, tanto en el modelo calculado numéricamente como en el modelo simulado.

Figura 8

Aleta circular larga y su variación de temperatura



Nota. Grafica del cambio de temperatura de sección transversal constante. Tomado de *Transferencia de calor y masa* (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana, por (Cengel & Ghajar 2007).

El calor se transferirá al lago al ser una aleta un medio por el cual el medio se transferirá, pero la temperatura caerá por su diferencia entre la base y la punta de esta. Para ellos se plantea una ecuación que busca calcular una eficiencia en la transferencia de la aleta, para demostrar el uso o no de la aleta en el proceso.

$n_{aleta} = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c}$	(4)
--	-----

Para ellos se definen las ecuaciones necesarias en este cálculo:

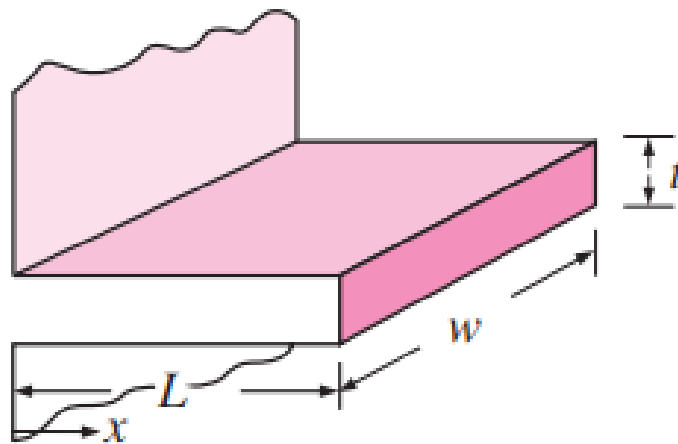
$m = \sqrt{2h / kt}$	(5)
----------------------	-----

$L_c = L + t/2$	(6)
-----------------	-----

Siendo L_c la longitud corregida de la aleta y m la relación de la transferencia en función del espeso, aleta al igual que sus dimensiones están presentes en la siguiente figura

Figura 9

Dimensiones eficiencia aleta rectangular



Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa* (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana, por (Cengel & Ghajar 2007).

A esto se le suma el cálculo del área de la aleta, esta será necesaria en el momento de calcular la transferencia de calor y la efectividad.

$A_{aleta} = 2wL_c$	(7)
---------------------	-----

Como se dijo en el párrafo anterior, hay un concepto clave asociado a las aletas; que es la efectividad, para comparar el uso de las aletas buscando una mejora, este parámetro nos dictamina si el agregado de las aletas es útil o por si el contrario, no justifica el uso de estas. La ecuación de esto es la siguiente:

$\varepsilon_{aleta} = \frac{n_{aleta} h A_{aleta} (T_b - T_{\infty})}{h A_b (T_b - T_{\infty})} = \frac{A_{aleta}}{A_b} n_{aleta}$	(8)
---	-----

El numerador es la transferencia de calor de la aleta, mientras que el denominador es la transferencia de calor sin las aletas, el resultado de esta división nos da un valor de efectividad en el uso de las aletas.

4.2.5.2 Modelo de Kraus de aleta con radiación y convección

El diseño optimo de aletas que convectivas-radiantes es escasamente estudiado, uno de los trabajos que se utilizará como guía será el de Sparrow & Niewerth (1968), ellos analizaron una aleta rectangular disipando calor mediante convección y radiación de manera simultánea. En su estudio se aclara que, la temperatura de su entorno convectivo se denota como T_a y la del sumidero radiactivo como T_s , (Kraus et al., 2001). Así la ecuación de la energía para la aleta puede ser escrita como:

$\frac{d^2\theta}{dX^2} = \zeta_1(\theta^4 - \theta_s^4) + \zeta_2(\theta - \theta_a)$	(9)
--	-----

Con las condiciones de contorno:

$$X = 0, \quad \theta = 1$$

Y:

$$X = 1, \quad \frac{d\theta}{dx} = 0$$

Donde:

$$\theta = \frac{T}{T_b}, \quad X = \frac{x}{b}$$

$\zeta_1 = \frac{2\varepsilon\sigma T_b^3 b^2}{k\delta}$	(10)
--	------

$\zeta_2 = \frac{2hb^2}{k\delta}$	(11)
-----------------------------------	------

Y:

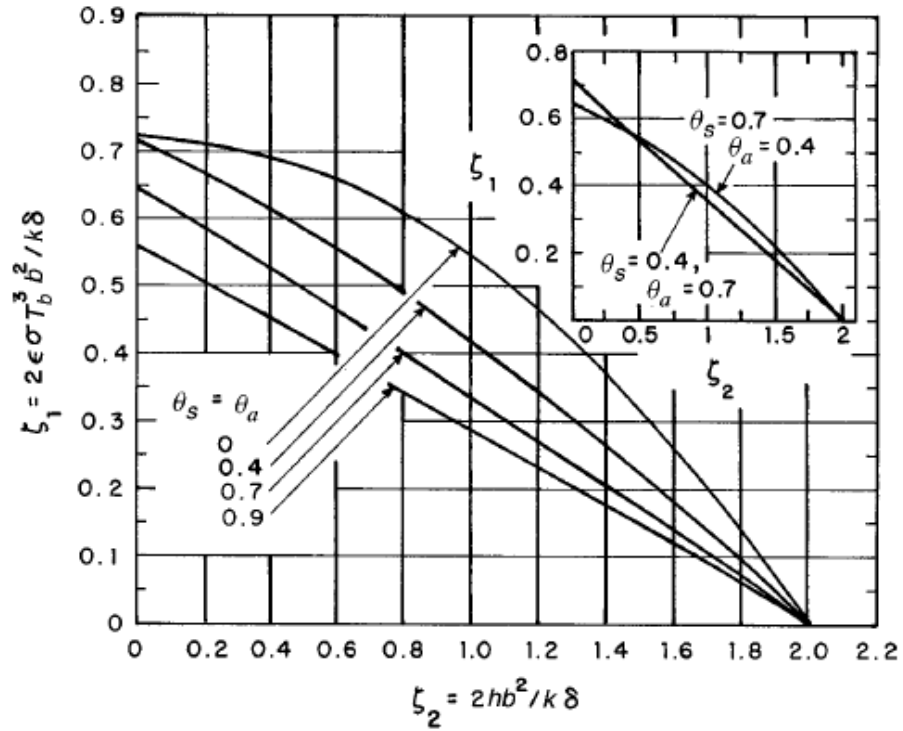
$\theta_s = \frac{T_s}{T_b}$	(12)
------------------------------	------

Con θ_s se pueden utilizar las siguientes figuras donde se obtiene las relaciones de eficiencia con la combinación de valores ζ_1 y ζ_2 , en donde dicha relación se expresa como:

$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{\varepsilon\sigma T_b^3}{h}$	(13)
---	------

Figura 10

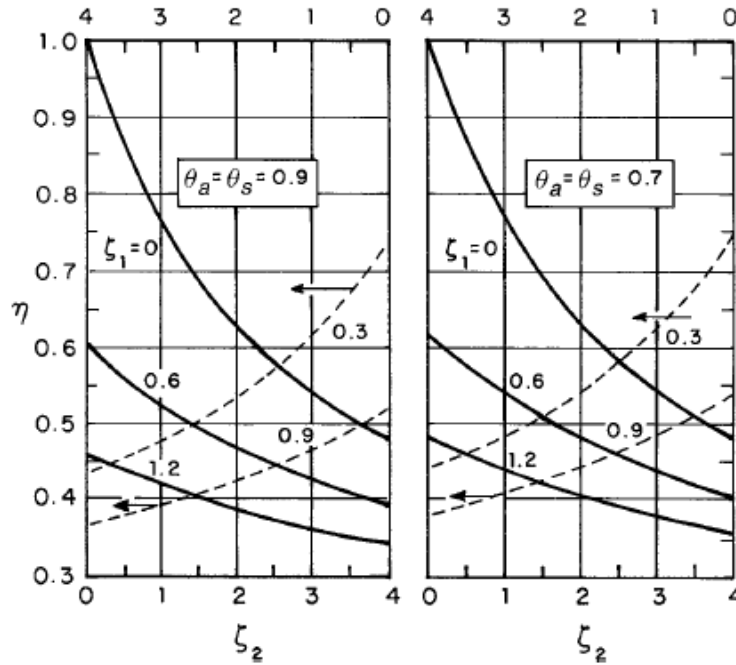
Curvas de diseño óptimo para una aleta longitudinal convectiva-radiante de perfil rectangular.



Nota. Adaptado de Sparrow y Niewerth (1968). Tomado de *Extended surface heat transfer* por (Kraus et al., 2001)

Figura 11

Eficiencia de una aleta longitudinal convectiva-radiante de perfil rectangular.



Nota. Adaptado de Sparrow y Niewerth (1968). Tomado de *Extended surface heat transfer* por (Kraus et al., 2001)

$\frac{b^2}{\delta} = \frac{\zeta_2 k}{2h}$	(14)
---	------

$q_{id} = \frac{q}{\eta}$	(15)
---------------------------	------

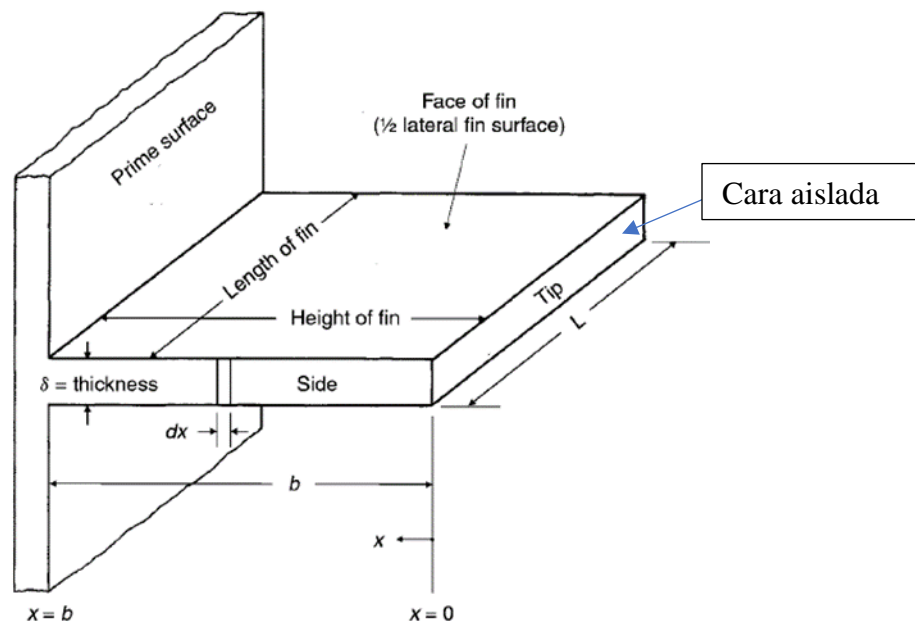
$b = \frac{q_{id}}{2[\varepsilon\sigma(T_b^4 - T_s^4) + h(T_b - T_s)]}$	(16)
---	------

$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}}$	(17)
---	------

En la figura a continuación, se puede denotar la terminología usada por Kraus (2001) para el dimensionamiento de aletas longitudinales.

Figura 12

Aleta de perfil rectangular



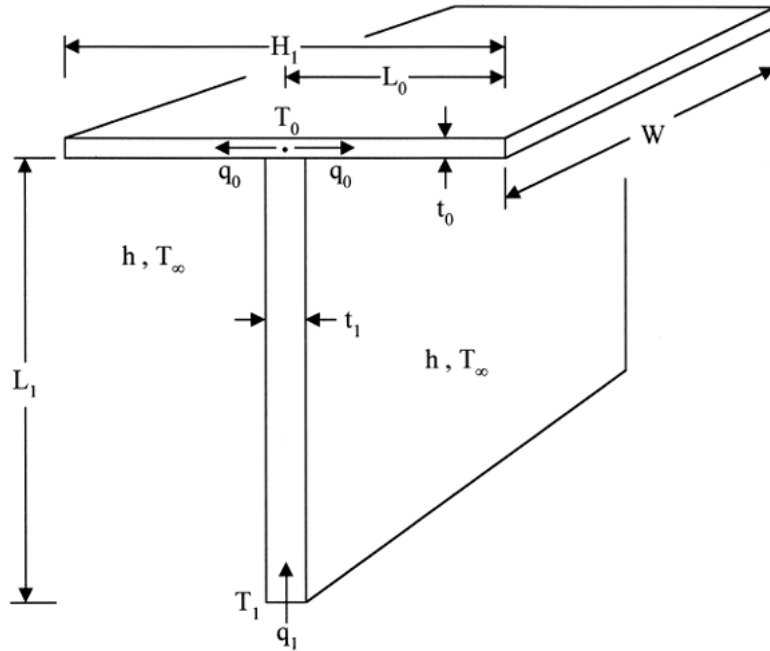
Nota. Tomado de *Extended surface heat transfer* (p. 26) por (Kraus et al., 2001)

4.2.5.3 Aletas tipo "T"

El modelo matemático de Bejan (2000) propone una geometría en forma de "T", esta busca tener una mejor relación de la transferencia de calor, dicha aleta se ve de la siguiente manera.

Figura 13

Aleta en T



Nota. Tomado de *Constructal T-shaped fins* (p.2) por (Bejan & Almgel, 2000)

Dicha aleta sigue las ecuaciones presentadas por Bejan (2000), este es un modelo de conducción unidireccional, el cual busca tener una mejora frente a otras geometrías similares, dicha mejora está ligada a la transferencia de calor en función de los espesores y longitudes (L_1/L_0) y (t_1/t_0). Las ecuaciones que describen este modelo son:

$A = 2 \cdot L_0 \cdot L_1$	(18)
-----------------------------	------

Siendo A el área

$A_F = 2 \cdot L_0 \cdot L_1 + t_1 \cdot L_1$	(19)
---	------

Donde A_F es la restricción de volumen del material de las aletas

También se plantea una fracción de volumen de la aleta dictada por la ecuación

$\phi = 2 \cdot \bar{L}_0 \cdot \bar{t}_0 + \bar{L}_1 \cdot \bar{t}_1$	(20)
--	------

Al ser un modelo dependiente de sus espesores, se plantea una ecuación que relaciona el fenómeno de transferencia por conducción y convección, este a su vez está ligado al área de la aleta

$\alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot \sqrt{A}}{k}}$	(21)
--	------

Donde:

k = Constante de conductividad térmica de la aleta [$Wm^{-1} - K^{-1}$]

h = Coeficiente de transferencia de calor [$Wm^{-2} - K^{-1}$]

Lo que propone Bejan (2000) es parametrizar los valores a mejorar (L_1, L_0, t_1 y t_0) de modo que se vuelva adimensionales, dichas ecuaciones son las siguientes:

$\bar{L}_0 = \frac{L_0}{\sqrt{A}}$	(22)
------------------------------------	------

$\bar{L}_1 = \frac{L_1}{\sqrt{A}}$	(23)
------------------------------------	------

$\bar{t}_0 = \frac{t_0}{\sqrt{A}}$	(24)
------------------------------------	------

$\bar{t}_1 = \frac{t_1}{\sqrt{A}}$	(25)
------------------------------------	------

El volumen según la aleta de Kraus es:

$V = (L_0 \cdot 2 \cdot t_0 + L_1 \cdot t_1) \cdot W$	(26)
---	------

El gradiente de la temperatura es:

$\theta = \frac{T_{cero} - T_{\infty}}{T_{uno} - T_{\infty}}$	(27)
---	------

Con todo esto se calcula la conductancia global adimensional definida por:

$\bar{q}_1 = \alpha \sqrt{t_1} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{\alpha \cdot \bar{L}_1}{\sqrt{t_1}}\right) - \theta}{\sinh\left(\frac{\alpha \cdot \bar{L}_1}{\sqrt{t_1}}\right)}$	(28)
--	------

Figura 14

Ejemplo de geometría tipo piña de pino

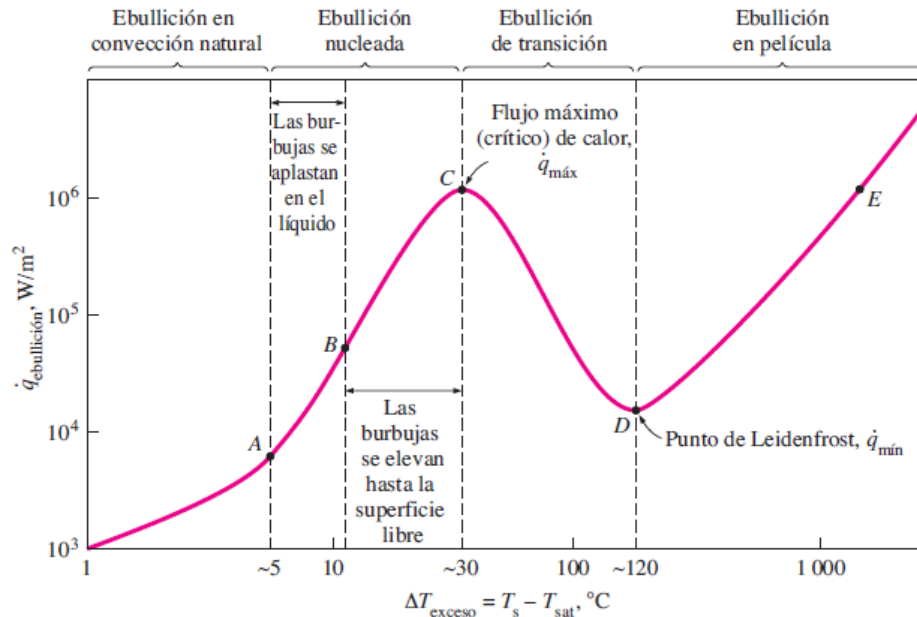


Nota. Piña de pino utilizada como modelo orgánico para el modelamiento de aletas.

Tomado de: *Shape and Structure, From Engineering to Nature*

4.2.5 Ebullición de película

La ebullición de película se da en una región de la curva típica de ebullición en la que la superficie de calentamiento queda cubierta por completo por una película continua estable de vapor, a este punto se le conoce como Leidenfrost, él observó este fenómeno, al ver que gotitas de líquido sobre una superficie muy caliente saltan de un lado a otro y se evaporan con lentitud, por tal razón hay una baja transferencia de calor en la región de ebullición de película, sin embargo, aumentara con la temperatura de exceso a través de la película de vapor en forma de radiación.

Figura 15*Curva de ebullición del agua a 1 atm*

Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa* (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana, por (Cengel & Ghajar 2007).

Un proceso típico de ebullición no seguirá la curva más allá del punto C, como lo observó Nukiyama en sus experimentos. Nukiyama notó, que cuando la potencia aplicada al alambre de nicromo sumergido en agua superaba ligeramente q_{\max} , la temperatura del alambre aumentaba abruptamente hasta su punto de fusión (1500 K) y se apagaba sin poder controlarlo. Al repetir los experimentos con alambre de platino, que tiene un punto de fusión mucho más alto (2045 K), pudo evitar que se consumiera y mantener flujos de calor más altos que q_{\max} . Al reducir gradualmente la potencia, obtuvo la curva de ebullición, con una caída repentina en la temperatura en exceso al alcanzar q_{\max} . Al reducir gradualmente la energía, obtuvo la curva de enfriamiento, con una caída

súbita en el exceso de temperatura al alcanzar q_{min} . Para que el proceso de ebullición pueda seguir en la parte de ebullición de transición de la curva más allá del punto C, la potencia aplicada se debe reducir de forma abrupta. La ebullición de película se da en un margen de $\Delta T_{exceso} = T_s - T_{sat} > 120 \text{ }^\circ\text{C}$ (Transferencia de calor y masa cengel)

Para la ebullición en película en estanque se presentan correlaciones matemáticas que permiten encontrar El calor y los coeficientes de transferencia presentes en el proceso

$\dot{q}_{película} = C_{película} \left[\frac{gk_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) [h_{fg} + 0.4C_{pv}(T_s - T_{sat})]}{\mu_v D (T_s - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}} (T_s - T_{sat})$	(29)
--	------

Donde:

$C_{película} = 0.62$ para cilindros

$\dot{q}_{película}$ = flujo de calor en ebullición de película, $\frac{W}{m^2}$

k_v^3 = conductividad térmica del vapor, $\frac{W}{m \text{ }^\circ\text{C}}$

ρ_v = densidad del vapor a temperatura de saturación, $\frac{kg}{m^3}$

ρ_l = densidad del liquido a temperatura de saturación, $\frac{kg}{m^3}$

h_{fg} = entalpia de vaporización, $\frac{J}{kg}$

C_{pv} = calor específico del vapor, $\frac{J}{kg \text{ }^\circ\text{C}}$

μ_v = viscosidad del vapor $kg/m \text{ s}$

T_s = temperatura de superficie caliente, $^\circ\text{C}$

T_{sat} = temperatura de saturación del fluido, $^\circ\text{C}$

Para el q_{rad} se tiene:

$\dot{q}_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sat}^4)$	(30)
--	------

Donde

ε =Emisividad

σ =constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} W/m^2$)

T_s =temperatura de superficie caliente, K

T_{sat} =temperatura de saturación del fluido, K

El coeficiente de calor por convección

$\bar{h}_{conv} = C \left[\frac{gk_v^3\rho_v(\rho_l - \rho_v)[h_{fg} + 0.8C_{pv}(T_s - T_{sat})]}{\mu_v D(T_s - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}}$	(31)
---	------

Donde:

$C_{película}$ = 0.62 para cilindros

$\dot{q}_{película}$ =flujo de calor en ebullición de película, $\frac{W}{m^2}$

k_v^3 = conductividad térmica del vapor, $\frac{W}{m} \circ C$

ρ_v =densidad del vapor a temperatura de saturación, $\frac{kg}{m^3}$

ρ_l =densidad del liquido a temperatura de saturación, $\frac{kg}{m^3}$

h_{fg} =entalpia de vaporización, $\frac{J}{kg}$

C_{pv} =calor específico del vapor, $\frac{J}{kg} \text{ } ^\circ C$

μ_v =viscosidad del vapor $kg/m \text{ } s$

T_s =temperatura de superficie caliente, $^\circ C$

T_{sat} =temperatura de saturación del fluido, $^\circ C$

$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}}$	(32)
--	------

Donde:

ε =Emisividad

σ =constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} \text{ } W/m^2$)

T_s =temperatura de superficie caliente, K

T_{sat} =temperatura de saturación del fluido, K

$\bar{h}^{\frac{4}{3}} = h_{conv}^{\frac{4}{3}} + h_{rad} h^{\frac{1}{3}}$	(33)
--	------

5. Resultados

5.1 Modelamiento matemático

Para el modelo matemático, se entiende el mecanismo de transferencia de calor que usa el termosifón al pasar la energía calórica por las aletas y las zonas libres al fluido dentro del reactor. Como primera instancia, se calcula el calor generado por el termosifón a las condiciones prescritas encontradas en la literatura, en el ciclo de ClCu hay una temperatura de operación de la termólisis con alrededor de 803,15K. Para facilitar los cálculos y dejando un delta prudente, la temperatura del fluido en operación se colocó a 873K, la temperatura del termosifón se tuvo en cuenta a partir de literatura previa en la que estos dispositivos se han llevado a los 1173K, contemplando que esta temperatura es cercana al límite para evitar la fatiga que puede mantener una resistencia intermitente a la oxidación del material (1143 K)

Los valores necesarios para el cálculo del calor son:

$$C_{película} = 0.62$$

$$k_v = 0,06657 \frac{W}{m K}$$

$$\rho_v = 0,280514 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_l = 958 \frac{kg}{m^3}$$

$$h_{fg} = 2258 * 10^3 \frac{J}{kg}$$

$$C_{pv} = 2134,35 \frac{J}{kg K}$$

$$\mu_v = 2,856 * 10^{-5} kg/m s$$

$$T_s = 1173 K$$

$$T_{sat} = 373 K, \text{ a presión atmosférica}$$

$$T_f = \frac{373+1173}{2} = 773 \text{ K}$$

Nota: Las propiedades del vapor se buscan a la temperatura T_f

Los valores de h_{fg} , ρ_l son obtenidos del apéndice A la cual es la tabla A-9 tomada de *Transferencia de calor y masa, 4ta edición* de y los valores k_v , ρ_v , C_{pv} , μ_v son tomados del apéndice B la cual es la tabla A-16 tomado de *Transferencia de calor y masa, 4ta edición*

$\dot{q}_{película}$

$$= 0,62 \left[\frac{(9,81)(0,06657)^3(0,280514)(958 - 0,280514)[2258 * 10^3 + 0.4(2134,35)(1173 - 373)]^{\frac{1}{4}}}{2,256 * 10^{-5}(0,04826)(1173 - 373)} \right]$$

$$* (1173 - 373)$$

$$\dot{q}_{película} = 105615 \text{ W/m}^2$$

El calor generado por el termosifón se divide en el de película y en el de radiación, por tanto:

$$\dot{q}_{rad} = 0,6146(5,67 * 10^{-8})(1173^4 - 373^4)$$

$$\dot{q}_{rad} = 65305 \text{ W/m}^2$$

Con los dos calores calculados se obtiene un:

$$q_{total} = 105615 + \frac{3}{4}(65305)$$

$$q_{total} = 154593 \text{ W/m}^2$$

Uno de los parámetros de entrada para el diseño con el modelo de Kraus, son un coeficiente h y un flujo de calor q en W/m , por tanto, calculamos un \bar{h}_{conv} y un \bar{h}_{rad} :

$$\bar{h}_{conv}$$

$$= 0,62 \left[\frac{(9,81)(0,06657)^3(0,280514)(958 - 0,289514)[2258 * 10^3 + 0.8(2134,35)(1173 - 373)]}{(2,256 * 10^{-5})(0,04826)(1173 - 373)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\bar{h}_{conv} = 139,39 W/m^2 K$$

$$\bar{h}_{rad} = \frac{(0,6146)(5,67 * 10^{-8})(1173^4 - 373^4)}{1173 - 373}$$

$$\bar{h}_{rad} = 81,62 W/m^2 K$$

Ahora para calcular un factor global de transferencia:

$$\bar{h}^{\frac{4}{3}} = (139,39)^{\frac{4}{3}} + (81,62)h^{\frac{1}{3}}$$

$$\bar{h} = 204,2 W/m^2 K$$

Calculando el flujo de calor total del termosifón se debe tener en cuenta una suposición para el diseño de aletas según Kraus. Para el diseño será necesario un flujo de calor unidimensional en W/m el cual calculamos de la siguiente forma:

$$No \text{ de aletas estimadas} = 12$$

El número de aletas se estimó de manera que se pudiesen ubicar de forma perimetral alrededor de la circunferencia del termosifón.

El flujo de calor por unidad de área, fue convertido a flujo por unidad de longitud al multiplicarlo por el largo del termosifón:

$$q = 154593 \frac{W}{m^2} * 0,262 m$$

$$q = 40503 W/m$$

Teniendo un arreglo de doce aletas, se divide el flujo de calor para obtener un flujo por cada aleta:

$$q_{aleta} = \frac{40503}{12}$$

$$q_{aleta} = 3375 \text{ W/m}$$

Ahora en el diseño de Kraus será necesario, el flujo de calor, el coeficiente de transferencia (h), y el coeficiente de conductividad (k). por lo tanto:

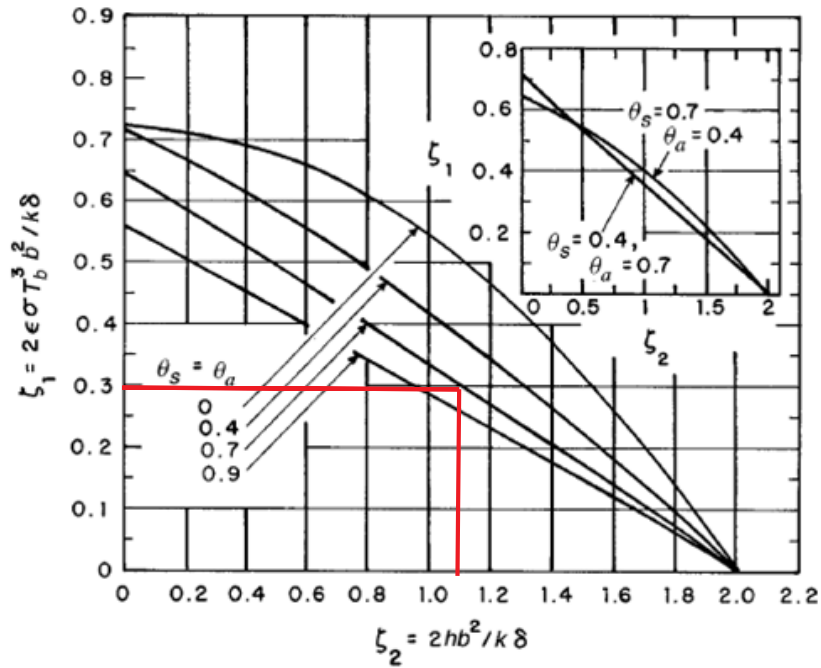
$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 * 10^{-8})(1173)^3}{204,2}$$

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = 0,2754 \text{ m}$$

Ahora, con esta relación se puede entrar a las gráficas que den una combinación de valores que cumplan esta relación.

Figura 16

Cálculo de combinación de ζ_1 y ζ_2



Nota. La combinación de valores debe cortar con la línea referente a $\theta_s = 0,7$

Se tienen entonces una combinación de valores aproximadamente:

$$\zeta_1 = 0,3$$

$$\zeta_2 = 1,1$$

Luego basados en la definición de ζ_2 , tendremos:

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,1)(22,33)}{2(204,2)}$$

$$\frac{b^2}{\delta} = 0,0602 \text{ m}$$

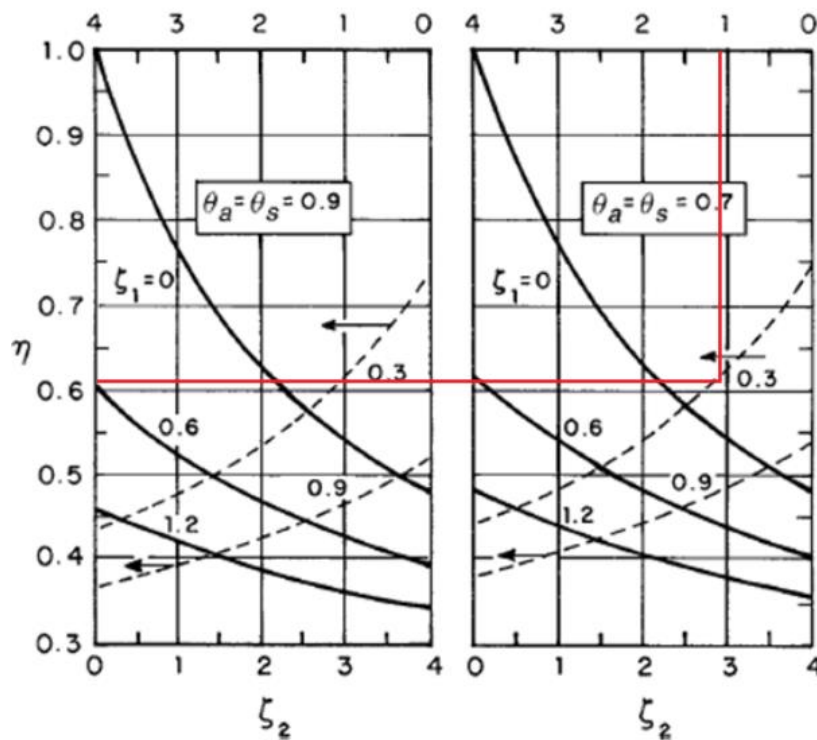
Como próximo paso a seguir, se calcula el calor ideal a disipar, teniendo en cuenta la eficiencia obtenida en la gráfica. Para hallar la eficiencia primero se debe tener θ_s :

$$\theta_s = \frac{1173}{873} = 0,74$$

Este valor nos dictamina que grafica utilizar, en este caso ser la de $\theta_s = 0,7$

Figura 17

Cálculo de la eficiencia mediante ζ_1 y ζ_2



Nota. Se busca el valor de la eficiencia en función de los valores obtenidos anteriormente.

La gráfica anterior nos marca una eficiencia de aproximadamente $\eta = 0,63$, con esta se halla el flujo de calor ideal para diseño, usando el calor estimado por aleta.

$$q_{id} = \frac{3375}{0,63} = 5357,14 \text{ W/m}$$

Teniendo el calor ideal se puede obtener un largo de aleta b , así:

$$b = \frac{5357,14}{2[0,6146(5,67 * 10^{-8})(1173^4 - 873^4) + 204,2(1173 - 873)]}$$

$$b = 0,0246 \text{ m}$$

Con b se puede calcular el espesor δ :

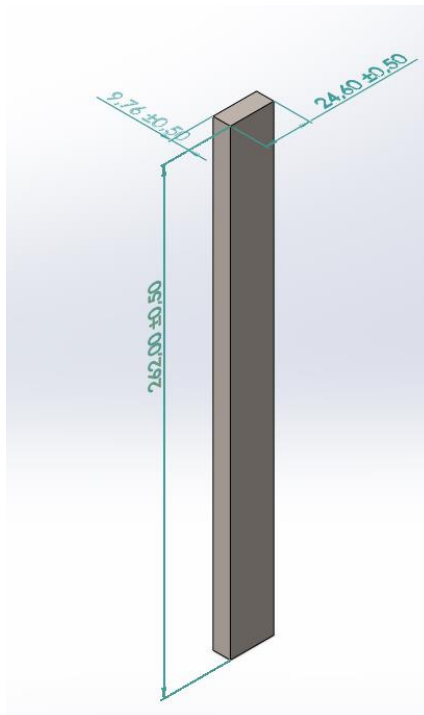
$$\delta = \frac{0,0246^2}{0,0602} = 0,00976 \text{ m}$$

Junto con la altura de la aleta que corresponde a la altura del termosifón sumergido

$$L = 0,262 \text{ m}$$

Figura 18

Aleta rectangular propuesta



Se tienen entonces las dimensiones de la aleta a las condiciones propuestas bajo el modelo matemático planteado en el libro de Kraus. Luego a esta aleta se le hizo una simulación que permite

conocer su comportamiento en régimen estacionario, estos parámetros de malla rigen todas las simulaciones presentes antes de las “aletas tipo pino”.

Figura 19

Características del mallado para las simulaciones de aletas Kraus y tipo T

Información de malla

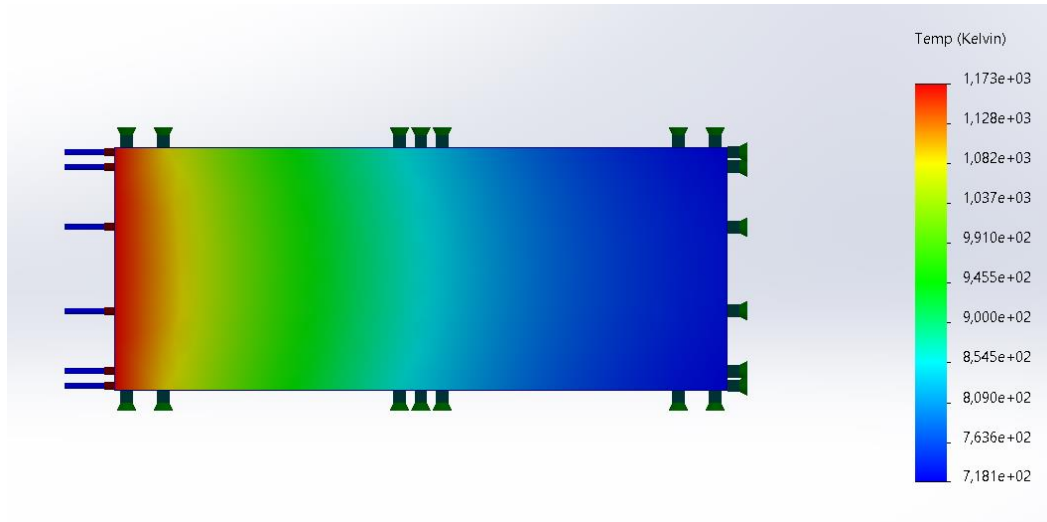
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	2,30952 mm
Tamaño mínimo del elemento	2,30952 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	104695
Número total de elementos	69403
Cociente máximo de aspecto	3,2835
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	100
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04
Nombre de computadora:	

Nota. Información de la malla utilizada en las simulaciones de “aletas tipo T” y de *KRAUS*, extraído del informe de SOLIDWORKS Simulation

La respuesta térmica entregada por la simulación se encuentra representada en la siguiente figura.

Figura 20*Respuesta térmica de la aleta propuesta*

Esta permite ver el comportamiento térmico de la aleta, para tal simulación se usaron los siguientes parámetros:

$$T_b = 1173 \text{ K}$$

$h = 139,39 \text{ W/m}^2\text{K}$ se usó el coeficiente de convección, ya que la simulación nos permitía agregar la carga por separada tanto en radiación como en convección

$$\varepsilon = 0,6146$$

$$T_\infty = 300 \text{ K}$$

A su vez, aprecia el gradiente de temperatura, con una $T_{punta} = 718 \text{ K}$. La caída de temperatura a lo largo de la aleta es más notable a partir de la mitad de la longitud de esta.

Se va a realizar la simulación con fluido estático (agua) para diferentes escenarios, todas ellas están regidas por los siguientes parámetros:

Figura 21

Parámetros simulación con fluido

Fluids	Water
Faces	Cara<1>@carcasa amplia<2>
Coordinate system	Face Coordinate System
Reference axis	Y
Thermodynamic Parameters	Static Pressure: 101325.00 Pa Pressure potential (Gravity): On Temperature: 293.20 K
Flow parameters	Velocity in X direction: 0 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s
Turbulence parameters type	Turbulence intensity and length
Intensity	0.10 %
Length	0.001 m
Flow type	Laminar and Turbulent
Cavitation	Off
Refer to the origin	Off

GG Bulk Av Temperature (Fluid) 8

Type	Global Goal
Goal type	Temperature (Fluid)
Calculate	Average value
Coordinate system	Global Coordinate System
Criteria	1.00 K
Use in convergence	On

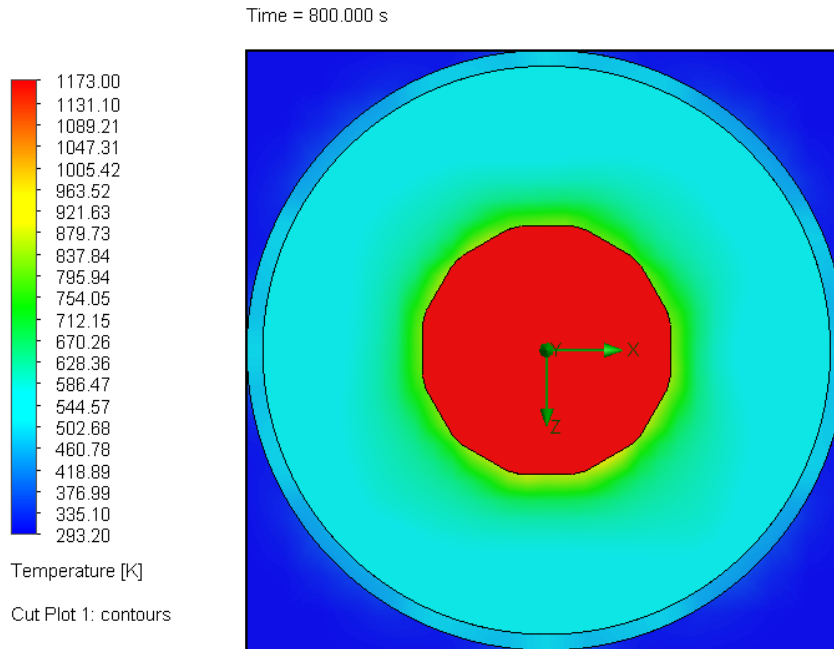
GG Minimum Heat Transfer Coefficient 13

Type	Global Goal
Goal type	Heat Transfer Coefficient
Calculate	Minimum value
Coordinate system	Global Coordinate System
Criteria	1.000 W/m ² /K
Use in convergence	On

Se utiliza una malla en automático con una resolución de 7 propuesta por el componente “Simulation” de SOLIDWRKS. Los datos presentados anteriormente son obtenidos del informe generado por el mismo software.

Figura 22

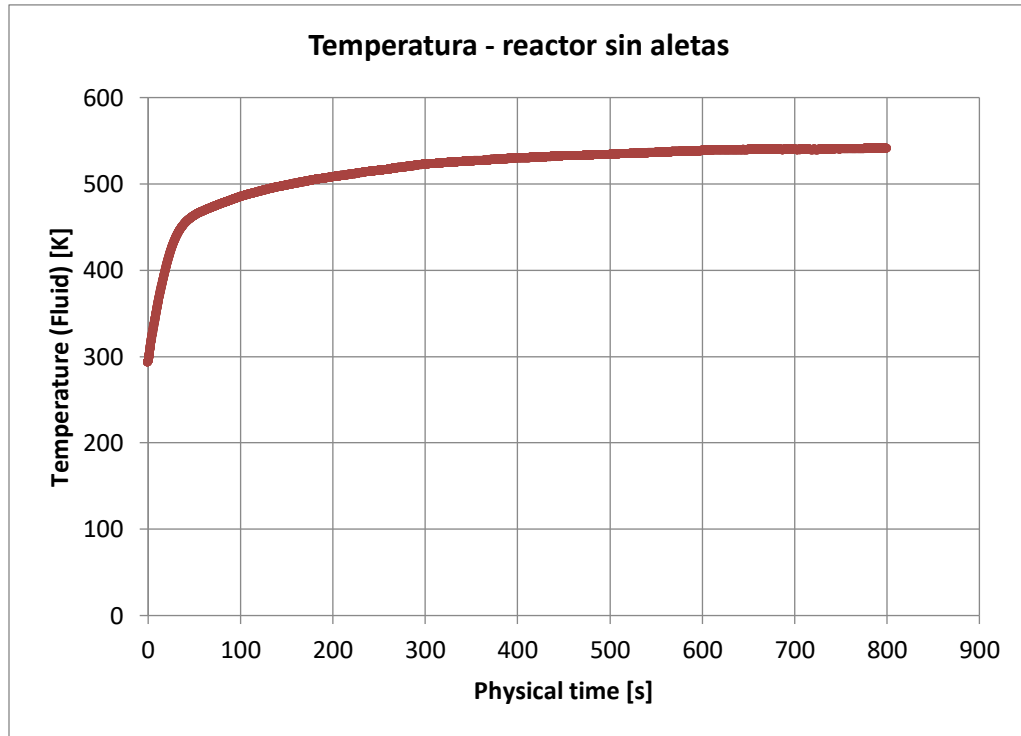
Respuesta térmica del termosifón sin aletas



Para tener un punto de referencia en cuanto al comportamiento del reactor se simuló en una configuración sin aletas, con el fin de identificar unos valores preliminares antes de la configuración con las aletas de Kraus propuestas. Se aprecia como la temperatura se concentra en el termosifón y el fluido en contacto con esta ronda entre los 537.5 a 541.5K aproximadamente, como se aprecia en la siguiente grafica.

Figura 23

Grafica temperatura promedio de fluido en reactor sin aletas

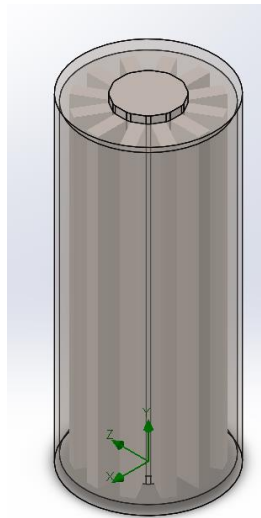


En este caso el rango de la temperatura es pequeño a causa del fluido circundante que está en contacto directamente al termosifón. El tiempo de la simulación fueron 800 segundos, ya que al intentar en primera instancia con 600 se evidenció que aún no llegaba a estado estacionario, se alcanzó el estado estacionario hasta los 741 segundos aproximadamente. La temperatura promedio del fluido registrada fue de $T_{\infty} = 540,84 K$

Para revisar este resultado se realizó una simulación con fluido estático (agua), con el arreglo propuesto de 12 aletas y la temperatura prescrita en el termosifón de 1173 K.

Figura 24

Modelo del termosifón y reactor en arreglo de 12 aletas



Fue simulado el comportamiento térmico del arreglo termosifón-aletas, estando sumergidos en agua. El paso entre el régimen transitorio y estacionario tarda alrededor de 400 segundos, la simulación, como se menciona con anteriormente, se rige por los parámetros de malla definidos previamente. La siguiente figura demuestra le respuesta obtenida.

Figura 25

Respuesta arreglo de 12 aletas Kraus y termosifón

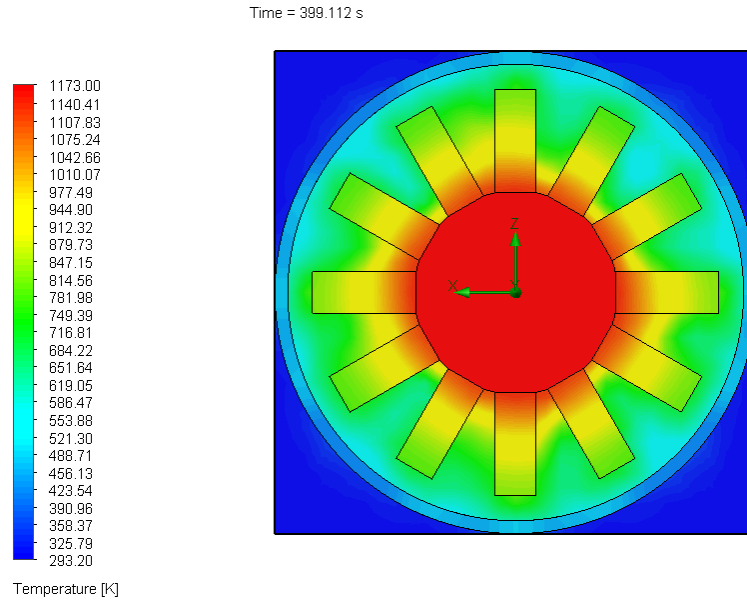
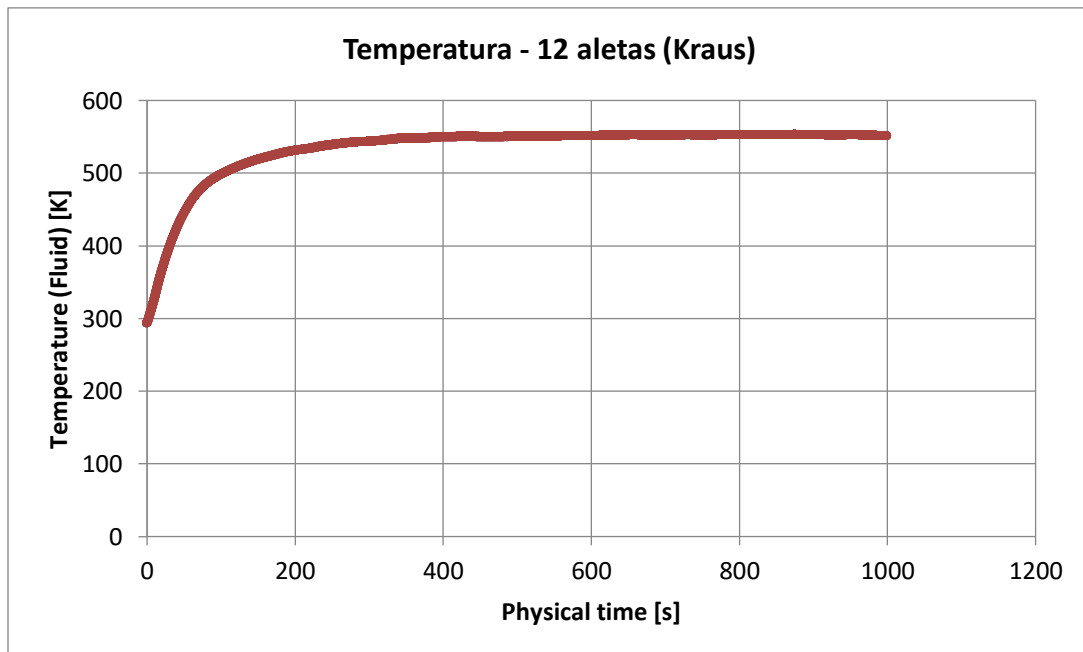


Figura 26

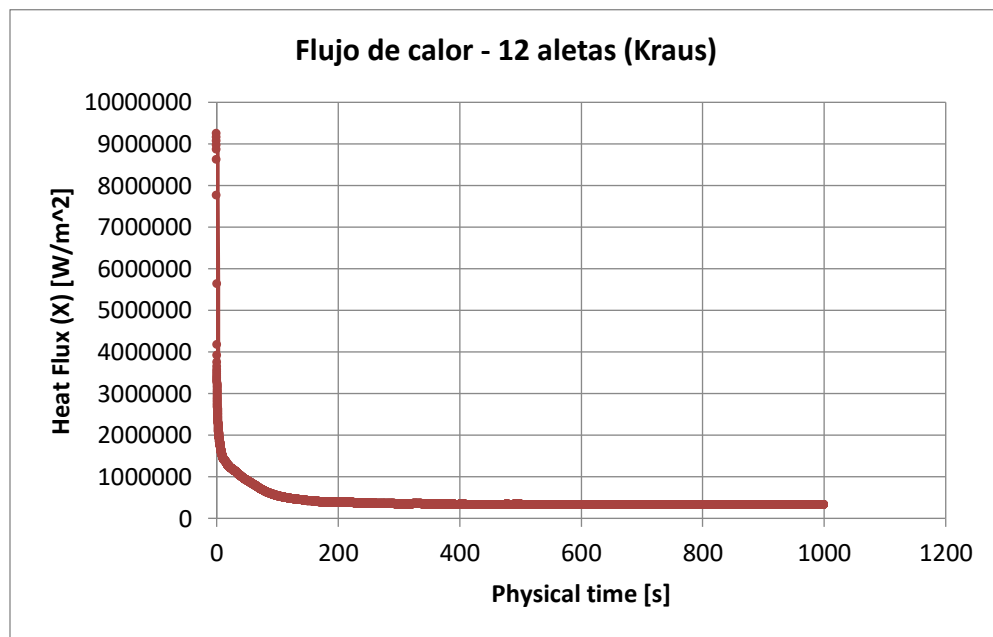
Grafica temperatura promedio del fluido reactor con 12 aletas (Kraus)



En la Figura 26, se muestra la curva de temperatura del fluido en relación con el tiempo, se puede apreciar que alrededor de los 421 segundos el régimen se vuelve estacionario y aplanada dicha curva. La temperatura promedio registrada en el fluido fue de $T_{\infty} = 551,23 K$

Figura 27

Grafica flujo de calor por aleta - 12 aletas (Kraus)

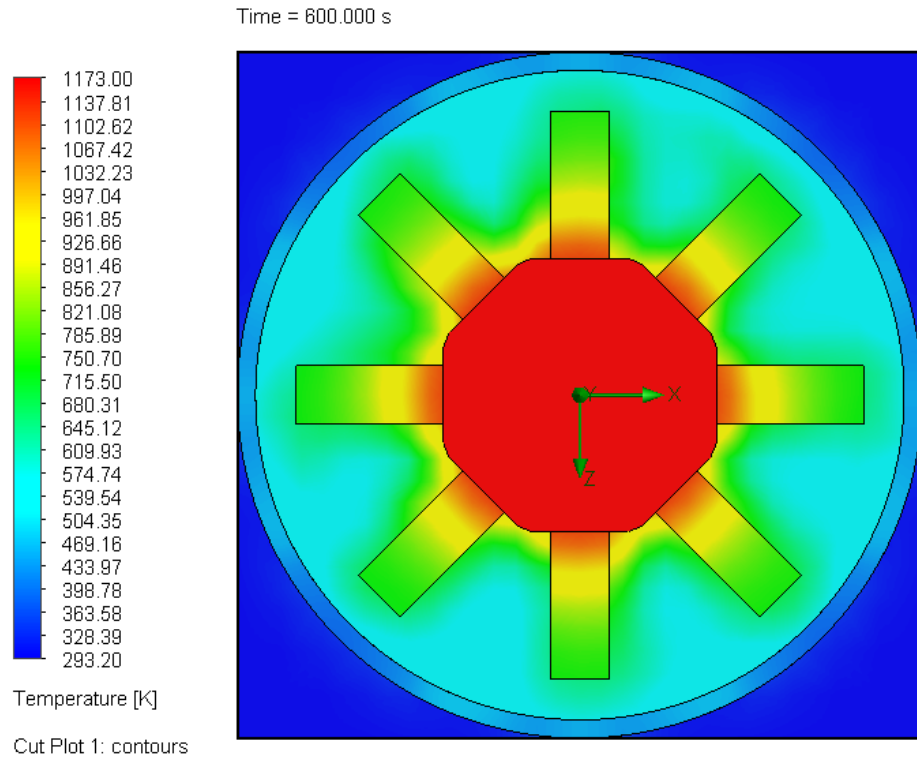


En la Figura 27, se muestra el flujo de calor promedio a través de una de las aletas, el valor promedio es de $319772,87 W/m^2$, este valor se tendrá en cuenta para futuras comparaciones.

Para tener otra perspectiva, y evidenciando la restricción de espacio que se mostrará en la Figura 33, se realiza un arreglo de 8 aletas Kraus con el fin de compararlo con un arreglo de 8 aletas tipo “T”.

Figura 28

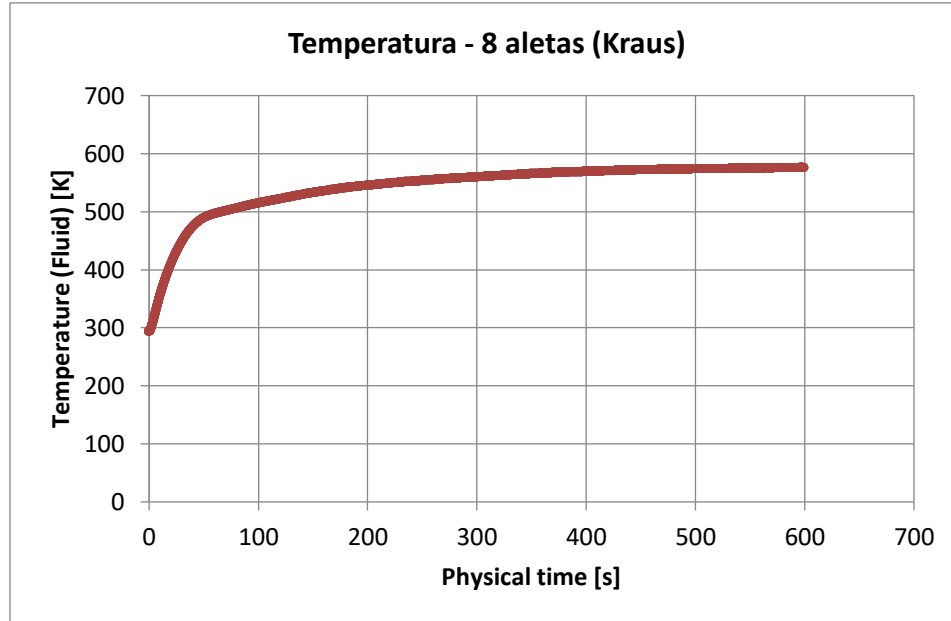
Respuesta arreglo de 8 aletas Kraus y termosifón



El comportamiento de la temperatura en dicha simulación se encuentra representada en la siguiente gráfica:

Figura 29

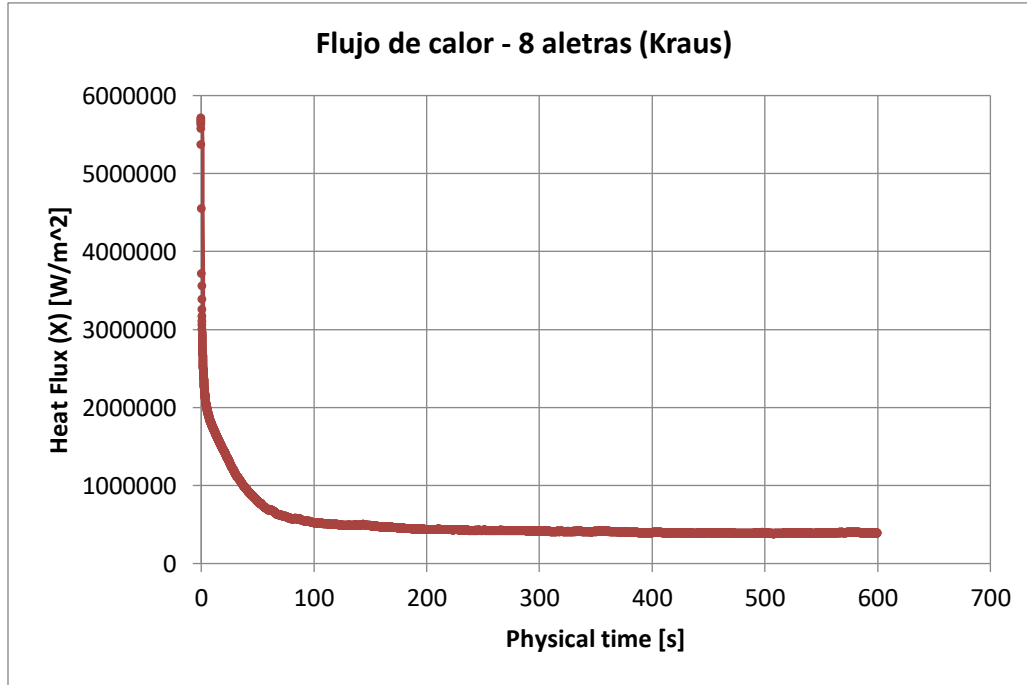
Grafica temperatura promedio reactor con 8 aletas (Kraus)



La Figura 29 muestra la curva de temperatura promedio del fluido en relación con el tiempo, se puede apreciar que alrededor de los 580 segundos el régimen se vuelve estacionario y aplana dicha curva. La temperatura promedio registrada en el fluido fue de $T_{\infty} = 555,54 K$

Figura 30

Grafica flujo promedio de calor por aleta - 8 aletas (Kraus)

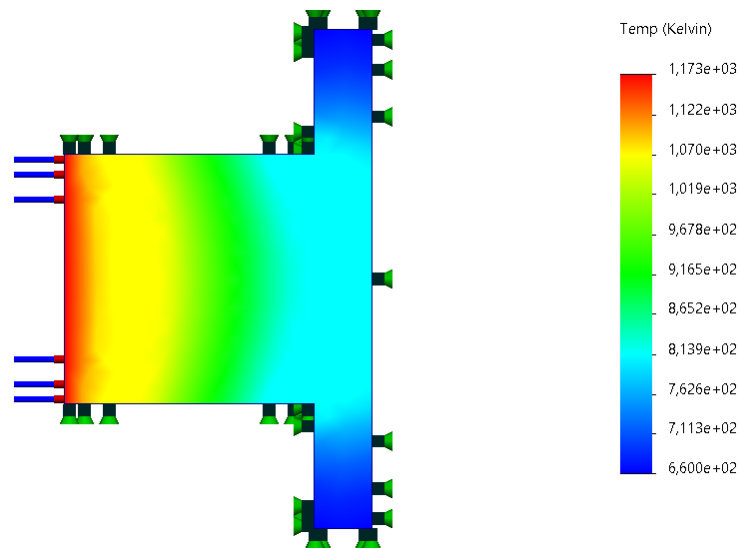


En la Figura 30 al igual que para la configuración de 12 aletas, muestra el flujo de calor promedio a través de una de las aletas, el valor promedio es de $385802,15 \text{ W/m}^2$.

En busca de tener una mayor área de transferencia también se utilizó el modelo de Bejan, teniendo en cuenta varios parámetros restrictivos, con el fin de encontrar una aleta de geometría tipo T que permita conservar el mismo volumen de la aleta de Kraus, pero que a su vez pudiera registrar una temperatura de fluido promedio mucho mayor.

Figura 31

Respuesta térmica en Aleta propuesta con el modelo de Bejan



La aleta mostrada corresponde a la iteración No 20 presente en la tabla del apéndice g. Se muestra el comportamiento de la temperatura evidencia una caída abrupta hacia las puntas de la aleta, teniendo una temperatura en punta de $T_{punta} = 660 K$, un 25% menos de la temperatura esperada $T_{punta} = 873 K$.

Los valores más relevantes de la simulación son los siguientes:

$$T_b = 1173 K$$

$h = 139,39 W/m^2K$ se usó el coeficiente de convección, ya que la simulación nos permitía agregar la carga por separada tanto en radiación como en convección

$$\varepsilon = 0,6146$$

$$T_\infty = 300 K$$

Con estos datos y la malla presentada a continuación delimitan los parámetros necesarios para realizar la simulación en el componente “Simulation” de SOLIDWORKS.

Figura 32

Características de mallado para la simulación de las aletas Kraus y T

☒ Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Tamaño máximo de elemento	2,30952 mm
Tamaño mínimo del elemento	2,30952 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

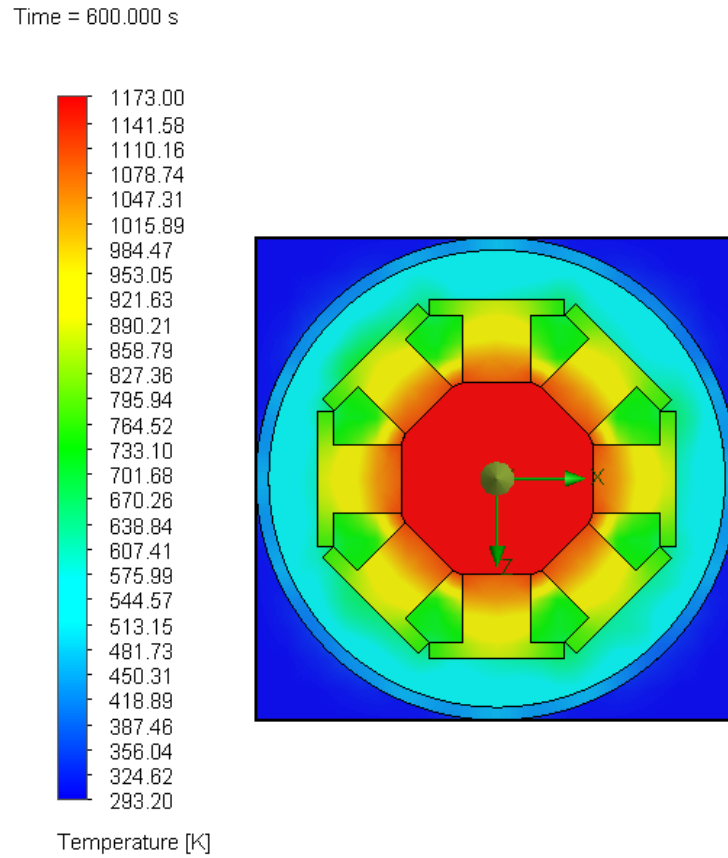
Información de malla - Detalles

Número total de nodos	104695
Número total de elementos	69403
Cociente máximo de aspecto	3,2835
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	100
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04
Nombre de computadora:	

Nota. Información de la malla utilizada en las simulaciones de “Kraus y T”, extraído del informe de SOLIDWORKS Simulation

Figura 33

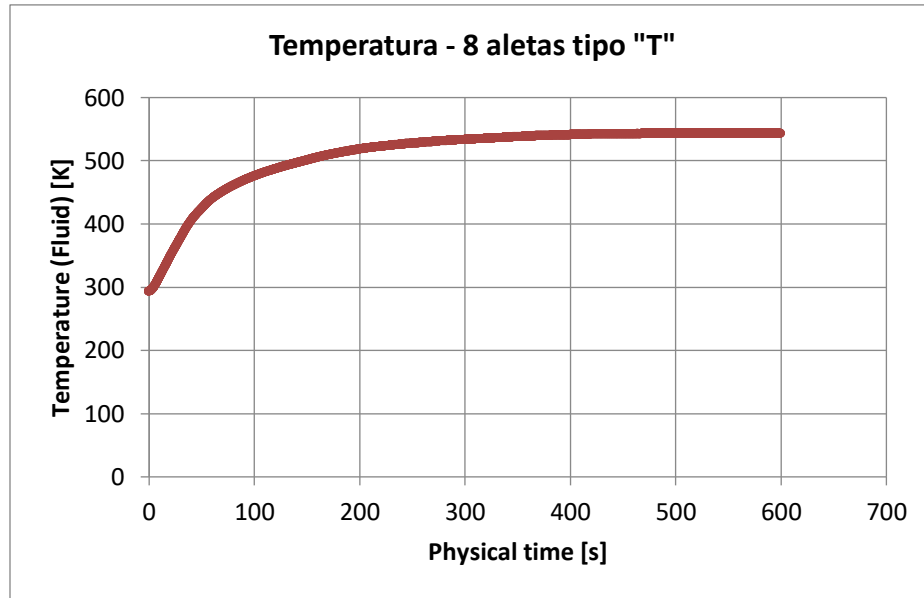
Respuesta arreglo de 8 aletas tipo "T" y termosifón



En la Figura 33 se puede observar el comportamiento de la temperatura con el arreglo de 8 aletas tipo T, la limitación de espacio se hace evidente, creando zonas estrechas hacia las puntas de las aletas.

Figura 34

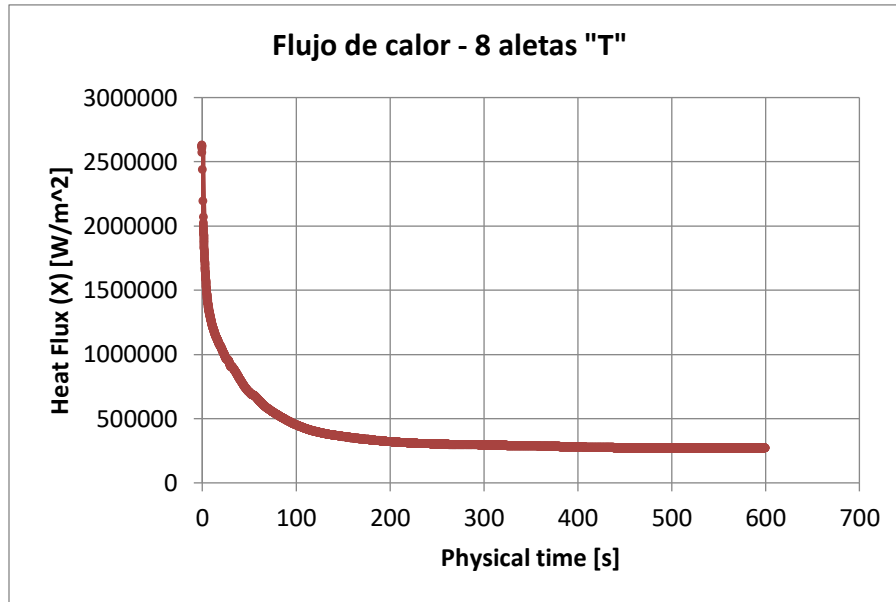
Grafica temperatura promedio de fluido reactor con 8 aletas "T"



En la Figura 34, se muestra la curva de temperatura promedio del fluido en relación con el tiempo, se puede apreciar que alrededor de los 427 segundos el régimen se vuelve estacionario y aplana dicha curva. La temperatura promedio registrada en el fluido fue de $T_{\infty} = 543,01 K$

Figura 35

Grafica flujo de calor a pared de aleta - 8 aletas en T



En anterior, se muestra el flujo de calor promedio a través de una de las aletas en el arreglo con el tipo “T”, el valor promedio es de 271321,88 W/m^2 ..

Buscando una mejora en el comportamiento de la transferencia, se calcula una segunda ramificación en la aleta principal, esta se rige con las mismas ecuaciones utilizadas anteriormente, pero con un $\theta_s = 0,9$, con esto se tiene:

$$T_b = 970 \text{ K}$$

$$T_\infty = 873 \text{ K}$$

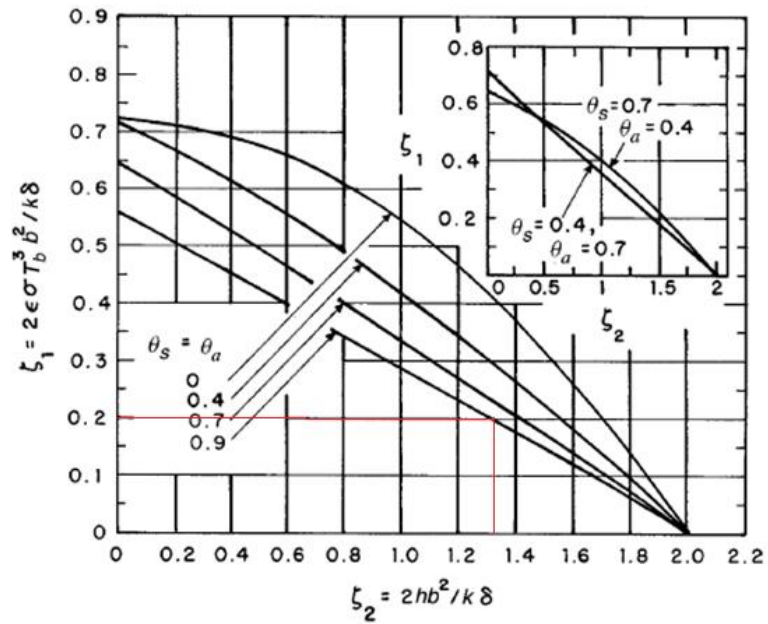
$$\theta_s = 0,9$$

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(970)^3}{204,2} = 0,155$$

Como se realizó anteriormente, se busca una combinación de ζ_1 y ζ_2 que cumpla con las condiciones.

Figura 36

Combinación de ζ_1 y ζ_2 para segunda rama



Se obtienen los siguientes datos:

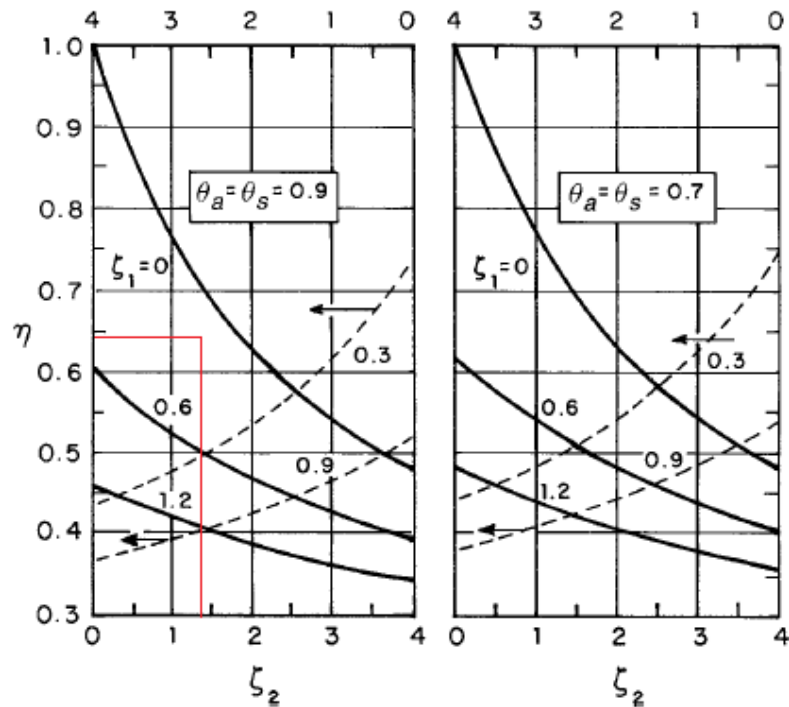
$$\zeta_1 = 0,2$$

$$\zeta_2 = 1,31$$

Una vez obtenidos estos valores buscamos saber la eficiencia de estas aletas.

Figura 37

η para segunda rama



Se obtiene el resulta de la eficiencia, con este, se realiza los siguientes cálculos.

$$n_{aleta} = 0,64$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,31)(22,33)}{2(204,21)} = 0,0716 \text{ m}$$

$$q_{id} = \frac{3375/5}{0,64} = 1054,68 \text{ W/m}$$

El calor es dividido en 5, ya que la segunda rama desprende 5 extremos iguales, con el fin de generar un efecto de piña de pino.

$$b = \frac{1054,68}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(970^4 - 873^4) + 204,2(970 - 873)]} = 0,0173 \text{ m}$$

Calculando el espesor de la segunda aleta se obtiene

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,00418 \text{ m}$$

Para generar aún mejor un efecto *piña de pino*, se realiza el cálculo y posterior simulación de una tercera ramificación, los cálculos a realizar serán con el fin de obtener un calor, el cual se bifurcará de nuevo en 5 aletas. Para ellos se tiene

$$q_{id} = \frac{675}{0,64} = 210,93 \text{ W/m}$$

Se divide en 5 de nuevo ya que la última rama de bifurca en 5 extremos más.

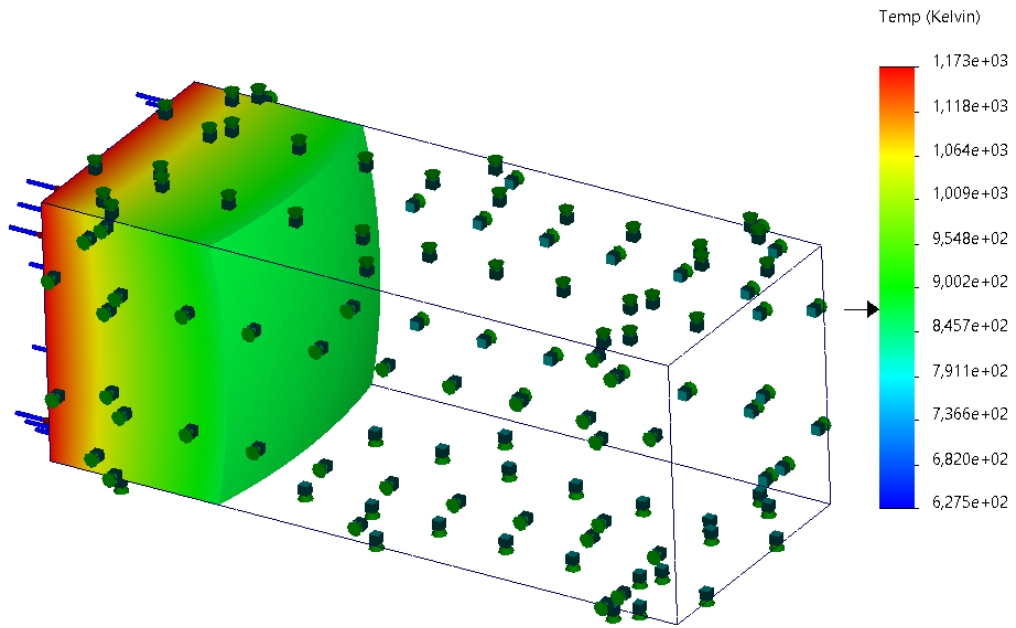
$$b = \frac{210,93}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(970^4 - 873^4) + 204,2(970 - 873)]} = 0,00336 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,00158 \text{ m}$$

Para poder conocer la longitud real de la aleta se utilizó una simulación, dando como resultado un gradiente de temperatura en isosuperficies. Esta dio una base para poder ajustar la geometría de la aleta. La primera fue utilizada para corregir la rama principal, dicha respuesta se encuentra presente en la siguiente figura:

Figura 38

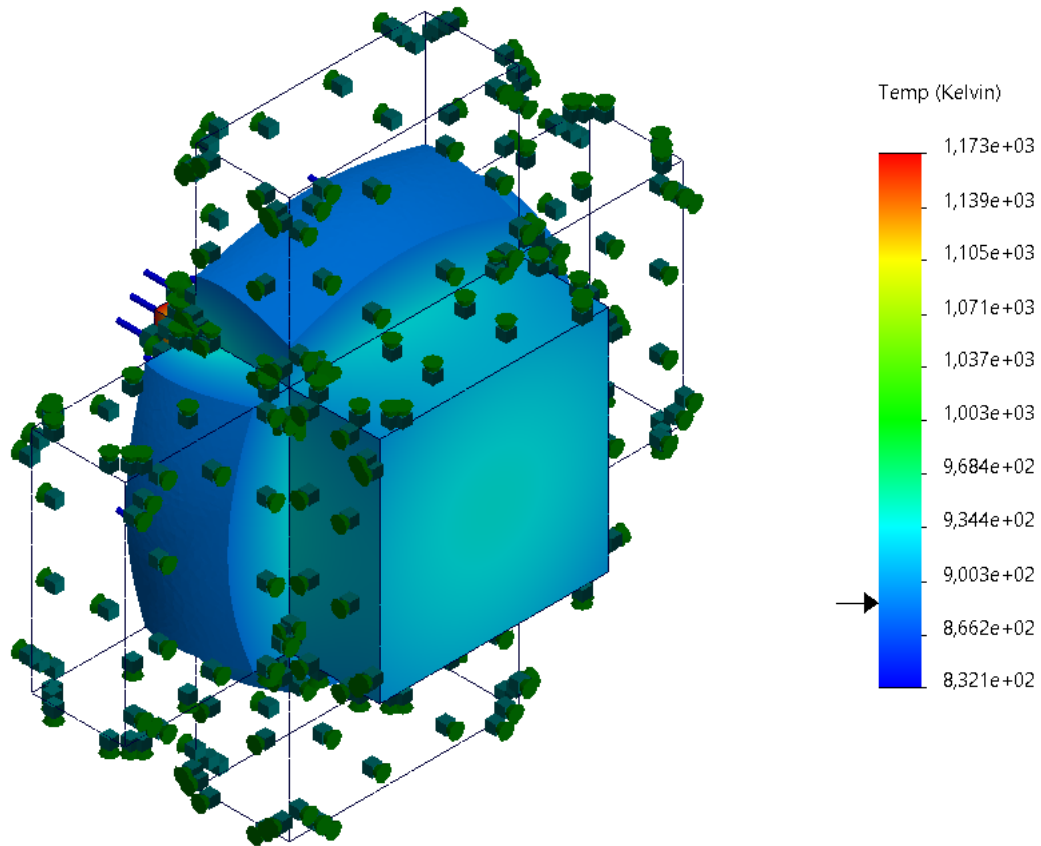
Isosuperficie a $T_{punta} = 873 \text{ K}$ en la aleta principal sin la corrección de longitud



Este proceso se repite para la primera ramificación, la simulación en isosuperficies para revisar la primera rama es la siguiente:

Figura 39

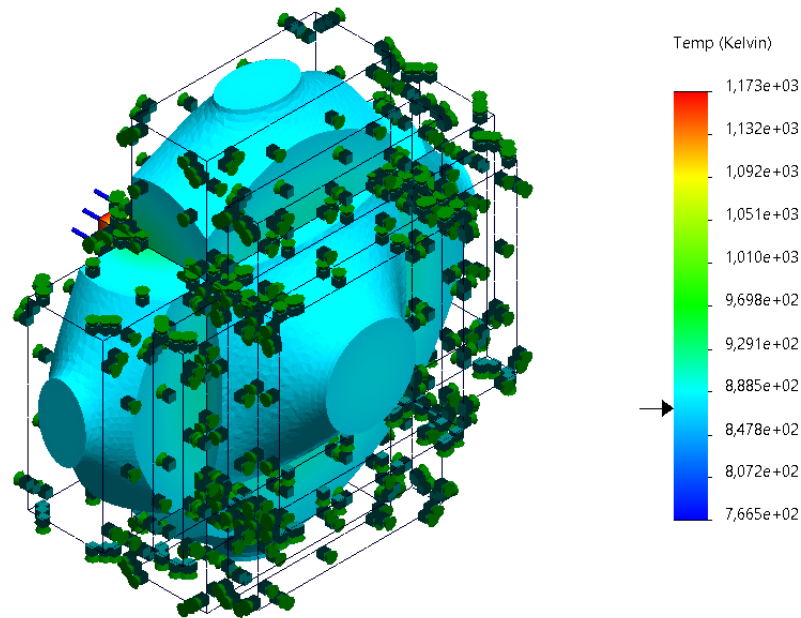
Isosuperficie a $T_{punta} = 873 \text{ K}$ en la rama primaria sin la corrección de longitud



Por último, se realiza el mismo procedimiento para la segunda rama, esta se hace presente en la siguiente figura:

Figura 40

Isosuperficie a $T_{punta} = 873 \text{ K}$ con la rama secundaria sin la corrección de longitud



Como resultado de este procedimiento se obtiene unos factores de corrección para b en la rama principal como en las ramas primaria y secundaria, además de un factor de ubicación para la rama primaria, teniendo así el factor $\gamma=0,39$ para la corrección de b en la rama principal, $\lambda=0,327$ para la corrección de b en la rama primaria, y un $\psi=0,5059$ para la corrección de b en la aleta secundaria, además del factor que permite la ubicación de la aleta primaria $\omega=0,0723$, que se aplica sobre la longitud b de la rama principal. La ubicación de la rama secundaria se determinó a la mitad de la longitud restante luego de la ubicación de la rama primaria.

Con estos datos y por medio del software SOLIDWORKS, se un mallado para ser usado posteriormente en la simulación térmica, los parámetros del mallado fueron los siguientes:

Figura 41

Características de mallado para la simulación de las aletas tipo pino

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	0,3 mm
Tamaño mínimo del elemento	0,3 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

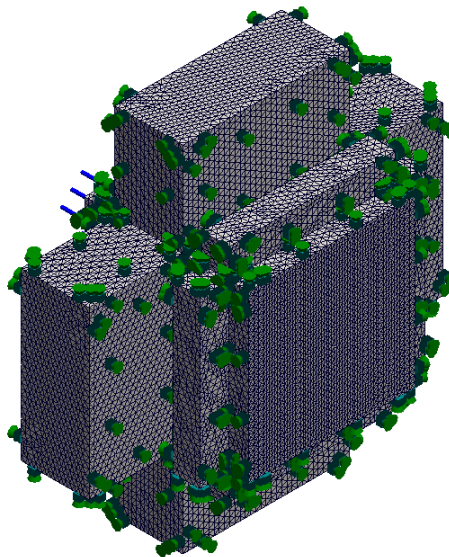
Información de malla - Detalles

Número total de nodos	545886
Número total de elementos	384030
Cociente máximo de aspecto	7,2022
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99,9
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:12
Nombre de computadora:	

Nota. Información de la malla utilizada en las simulaciones de “aletas tipo pino”,
extraído del informe de SOLIDWORKS Simulation

Figura 42

Imagen del mallado usado

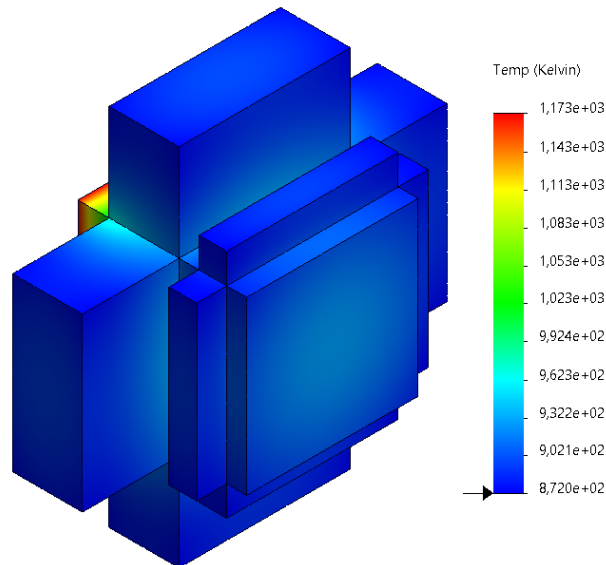


La Figura 42, es una representación visual de la malla en la geometría de aleta propuesta.

Una vez realizado estos pasos, se obtiene una respuesta térmica la cual esta plasmada en la siguiente figura:

Figura 43

Respuesta térmica del arreglo con $T_b = 1173 K$



Como se observa, la temperatura aumenta en comparación con el arreglo de una única aleta como se vio con antelación, para corroborar este análisis y con el fin de confirmar los resultados, se realizan 4 pruebas variando la temperatura de la base y la temperatura de la punta. Con esto, se busca evaluar el modelo de pino propuesto.

En los apéndices C, D, E y F se encuentran las ecuaciones de las 4 pruebas realizadas variando el delta de temperaturas, el apéndice C corresponde a la prueba #1 y así sucesivamente hasta llegar al apéndice F con la prueba #4.

Los datos de entrada y los cuales fueron variados se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 2*Valores de entrada para pruebas*

Entrada	T_b (K)	T_{punta} (K)	\bar{h}_{conv} ($\frac{W}{m^2K}$)	\bar{h}_{rad} ($\frac{W}{m^2K}$)
Prueba #1	700	500	133	23,51
Prueba #2	900	630	133,5	42,09
Prueba #3	1100	770	137,3	69,24
Prueba #4	1000	700	135,1	54,49

Por medio de las ecuaciones planteadas (ver ecuación 10 a 17 y 33), las gráficas de eficiencia y θ_s se obtienen las siguientes medidas para cada una de las aletas:

Tabla 3*Resultados de las 4 pruebas*

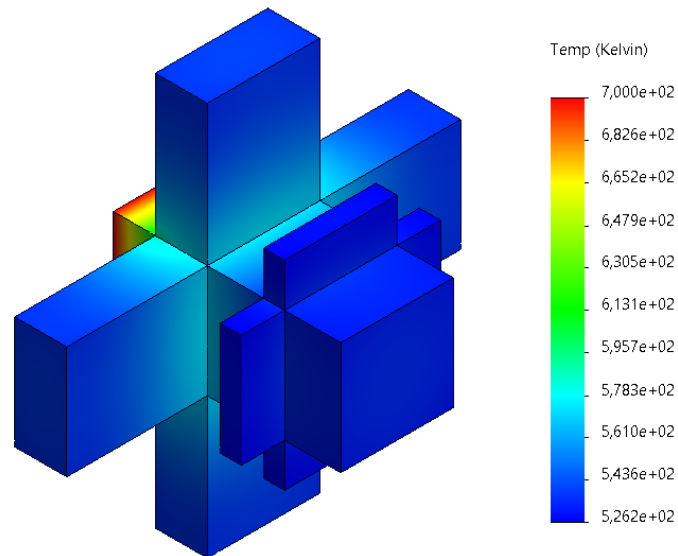
Resultado	$b_{principal}$ (m)	$\delta_{principal}$ (m)	$b_{rama 1}$ (m)	$\delta_{rama 1}$ (m)	$b_{rama 2}$ (m)	$\delta_{rama 2}$ (m)
Prueba #1	0,0083	0,00411	0,00513	0,01912	0,001589	0,000766
Prueba #2	0,0085	0,00511	0,0061	0,0032	0,001947	0,0015979
Prueba #3	0,009048	0,00807	0,006235	0,00417	0,00193	0,001669
Prueba #4	0,00856	0,006265	0,00614	0,00393	0,00196	0,001578

Se entiende como b el largo y δ el espesor de las aletas.

Una vez recopilados estos datos, se procede a realizar el modelamiento y la posterior simulación de las diferentes pruebas de la respuesta térmica de la geometría de pino planteada. A continuación, se irán mostrando los resultados del estudio térmico.

Figura 44

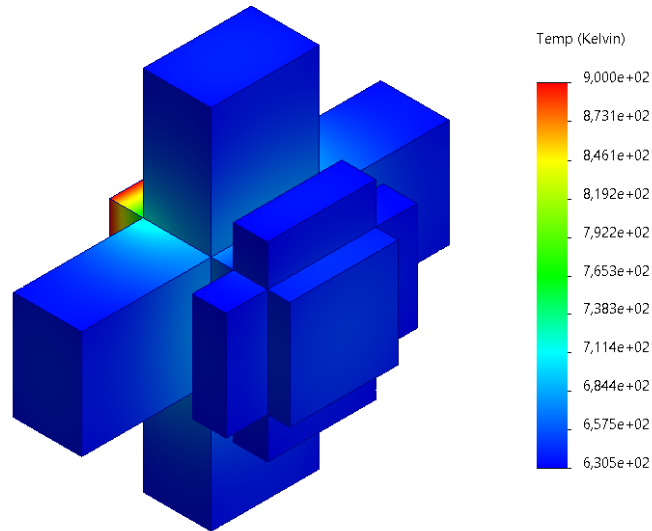
Respuesta térmica de la prueba #1 (arreglo con $T_b = 700\text{ K}$)



El resultado de la primera prueba nos arroja un porcentaje de error del 7%, ya que la temperatura esperada era de 560 K en la punta de la segunda ramificación, y el valor obtenido según la simulación fue de 526 K.

Figura 45

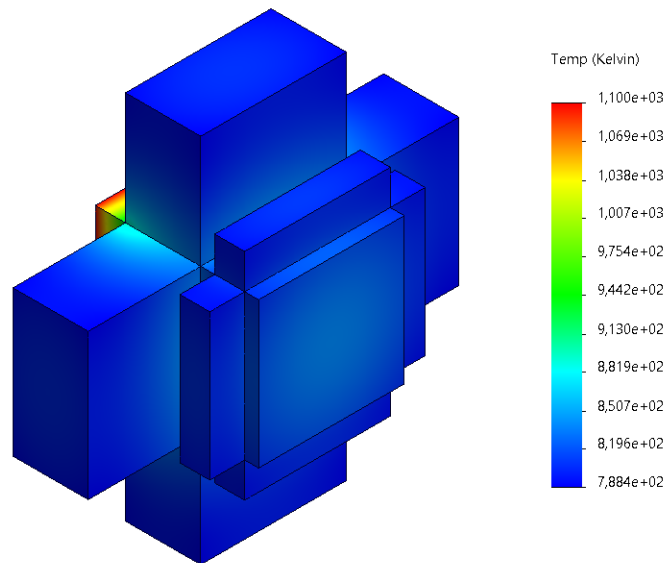
Respuesta térmica de la prueba #2 (arreglo con $T_b = 900\text{ K}$)



Para el caso de la segunda prueba, el porcentaje de error de temperatura en la punta es cercano 0%, según el modelo matemático se esperaba 630K, los cuales se pueden en el gráfico del trazado térmico.

Figura 46

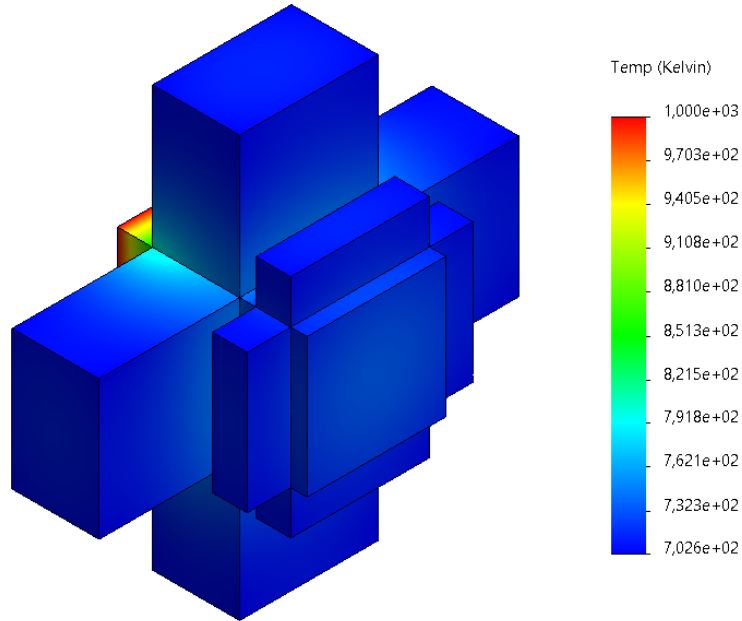
Respuesta térmica de la prueba #3 (arreglo con $T_b = 1100\text{ K}$)



En la tercera prueba se aprecia un error un poco superior al 2%, la temperatura esperada era de 770K siendo en la segunda ramificación donde se encuentran las temperaturas más bajas.

Figura 47

Respuesta térmica de la prueba #4 (arreglo con $T_b = 1000\text{ K}$)

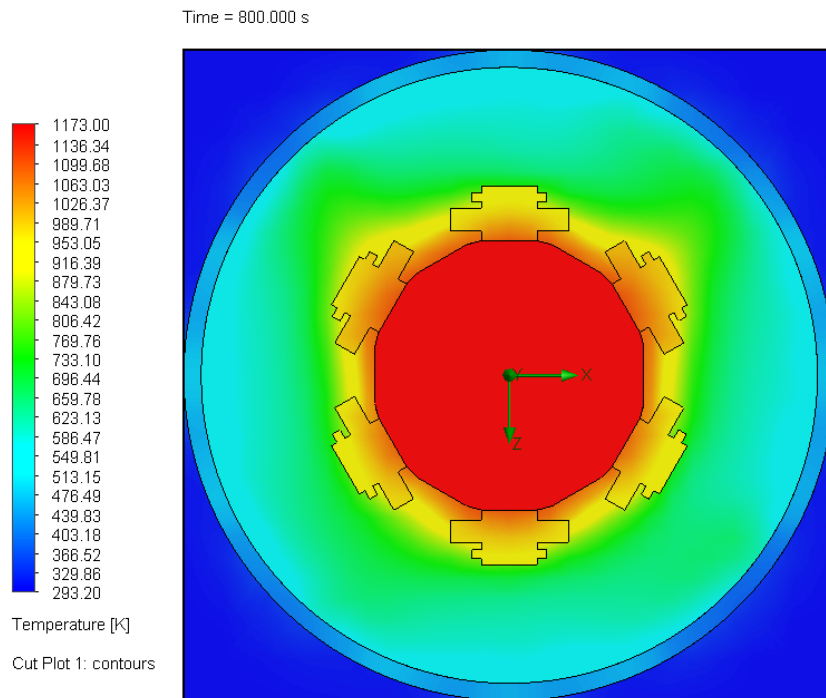


Por último, para la cuarta prueba se obtuvo un porcentaje de error cercano al 0%, la temperatura esperada después de la segunda ramificación fue de 700K.

Al comprobar este modelo, es montado al termosifón para analizar el comportamiento térmico del mismo, el resultado se encuentra presente en la siguiente figura.

Figura 48

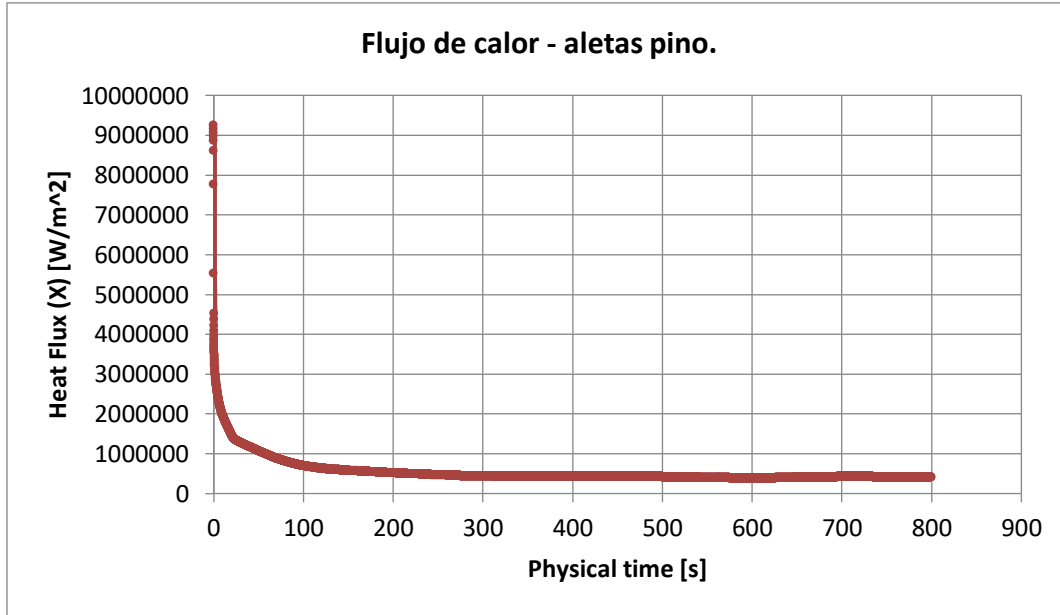
Respuesta térmica reactor con aletas tipo pino



En esta sección transversal se puede ver como se comporta el gradiente de temperatura del arreglo del reactor con aletas tipo pino, se puede ver una temperatura aproximada uniforme cercana al termosifón, y gradiente con menor caída hacia las puntas de las aletas.

Figura 49

Flujo de calor promedio por hilera de aletas en reactor con aletas tipo pino



El flujo de promedio registrado es de $413366,91 \text{ W/m}^2$ en el arreglo con aletas tipo pino, en este caso se tomó una hilera que corresponde a 7 aletas, contemplando que en los arreglos anteriores las aletas se extendían a lo largo de la longitud completa del termosifón, por tanto, para hacer una comparación más cercana se tomaron el número de aletas o la hilera de aletas en la misma cara en la que se colocaría una aleta de los arreglos anteriores.

Tabla 4*Datos comparativos de los diferentes arreglos del reactor*

Geometría	No de aletas	Área superficial mm^2	T promedio fluido (K)	t a estacionario (s)	Flujo de calor en aleta W/m^2	ϵ_{aleta}
Sin aletas	0	41319,16	540,84	741		
Kraus	12	263137,14	551,23	421	319772,87	3,92
Kraus	8	188744,16	555,54	580	385802,15	3,92
Bejan Aletas T	8	263692,69	543,01	427	271321,88	5,51
Aletas tipo pino	84	152542,14	574,83	594	413366,91	8,25

Figura 50

Geometría final del reactor

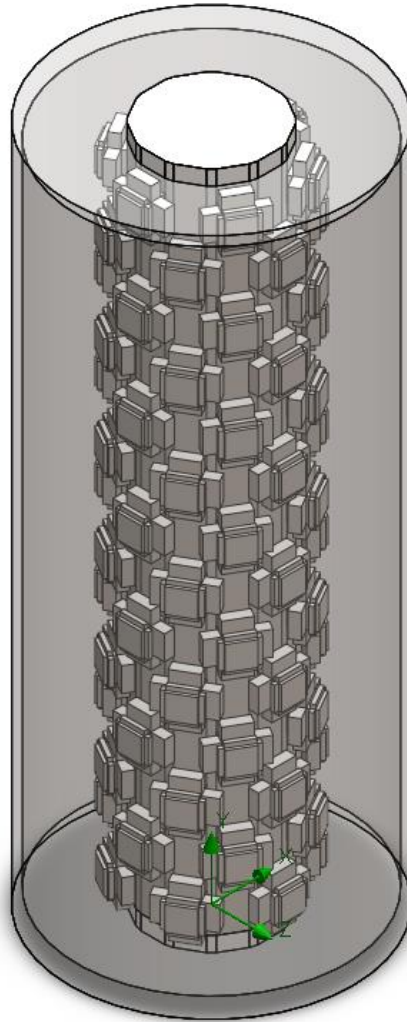
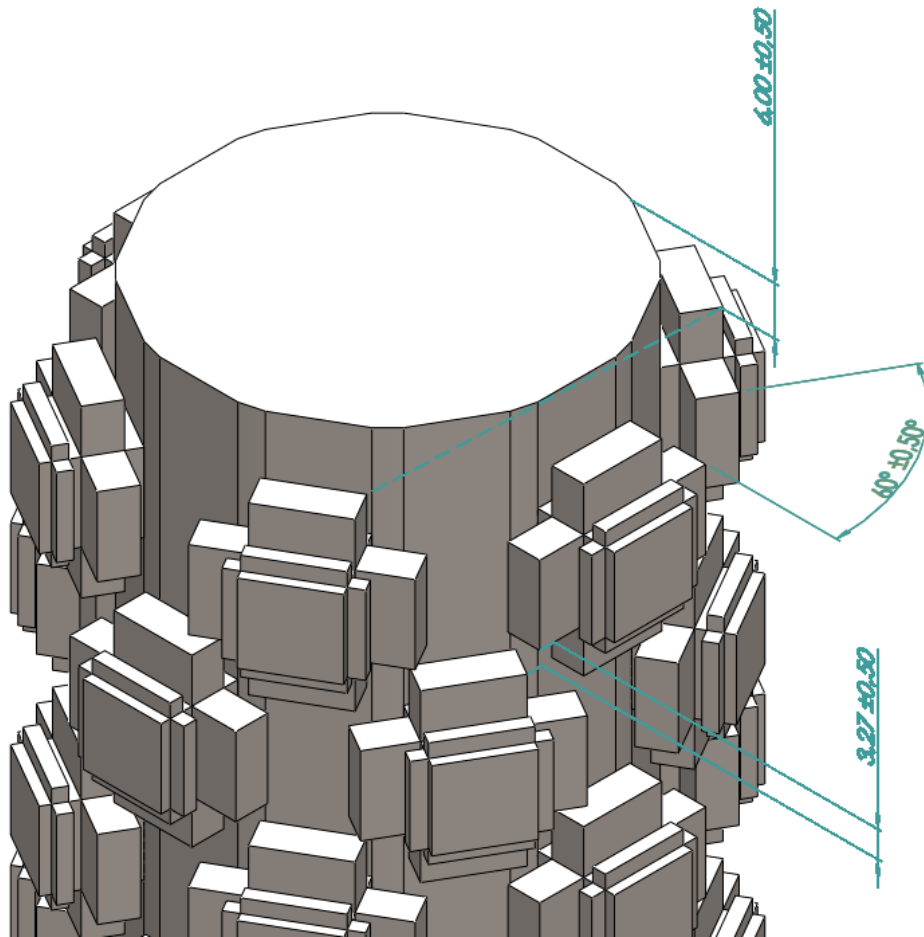


Figura 51

Vista ampliada de la configuración de aletas



En la Figura 50 y Figura 51 se muestra la geometría del reactor planteada, en la cual se anclaron al termosifón 84 aletas tipo pino, las cuales van ensambladas de manera intercalada, 7 por cada hilera, usando el mismo modelo de termosifón de la configuración con 12 aletas de Kraus.

6. Conclusiones

En este último capítulo se da respuesta al objetivo de investigación planteado al inicio del proyecto, la forma orgánica que se utilizó fue la de una “piña de pino”, en donde, de un cuerpo central se generan nuevas ramificaciones. Con esta configuración se obtuvo una mejor respuesta térmica en comparación con una aleta de sección transversal uniforme modelada a partir de la solución de Kraus. Mediante la simulación en régimen transitorio se pudo corroborar la mejora de la temperatura en punta comparada con la aleta de sección transversal uniforme modelada con Kraus, ambas simulaciones se ejecutaron con las mismas condiciones de contorno, obteniendo así, la temperatura en punta de la aleta convencional $T_{punta} = 718\text{K}$ y la aleta modelo tipo pino con $T_{punta} = 872\text{K}$ teniendo una mejora del 21%.

Las condiciones de operación de la reacción de termólisis fueron determinadas a partir de la literatura consultada teniendo así la $T_{\infty} = 803\text{K}$, sin embargo, se decide tomar una $T_{\infty} = 873\text{K}$, para facilitar los cálculos, y también teniendo en cuenta un margen de temperatura por encima, esto ocurriendo a presión atmosférica $P = 101,3\text{kPa}$ a la cual se evaluaron las propiedades del fluido (agua), contemplando que en varios procesos de termólisis se necesita la asistencia mediante la generación de vapor y la configuración planteada puede ser útil de esa manera.

Se observó que la conductividad térmica del material fue un factor que limitó la configuración geométrica de la aleta. Aletas con mayor longitud no consiguieron aumentar la capacidad de transferencia tan significativamente, Las simulaciones evidenciaron que las altas deben tener una geometría que proporcione la mayor área cerca de la base.

La comparación de la respuesta térmica modelada para las diferentes configuraciones de aletas evidenció que las aletas tipo pino proveen una mejora significativa en cuanto a la temperatura promedio del fluido con una temperatura $T_{\infty} = 574,86 K$ mejorando en un 6,7 % en comparación a la configuración sin aletas y también en cuanto al flujo de calor promedio a través de la aleta igual a $413366,91 W/m^2$ mejorando así el flujo en un 29% aproximadamente en comparación al arreglo inicial de 12 aletas. También que el paso del régimen transitorio al estacionario, aunque no es el más rápido, si supera a la configuración sin aletas ancladas al termosifón, con un tiempo $t = 594 s$. Al comparar las efectividades de las diferentes aletas, la aleta tipo pino tiene la mayor efectividad, esto debido a la relación de área superficial obtenida con una $\varepsilon_{aleta} = 8,25$.

La mejor configuración con aletas tipo pino permite alcanzar una temperatura más alta en comparación a las demás configuraciones, incluso siendo la segunda configuración con menor área superficial disponible, después de la configuración sin aletas, esto debido a la uniformidad del gradiente de temperatura a través de toda la aleta. La longitud reducida en comparación a la configuración del modelo de Kraus, por ejemplo, permite que el gradiente de temperatura no baje de manera tan abrupta, esto también considerando que el material empleado tiene un coeficiente de conductividad muy bajo.

La temperatura en las simulaciones singulares de cada aleta y la simulación en configuración con fluido varia, probablemente por asumir un coeficiente de transferencia constante a lo largo de toda la reacción, y también la variación puede deberse a la aproximación de los cálculos y los flujos de calor por cada aleta.

Referencias Bibliográficas

- Alcalde, J. J. A. (2016). *Diseño de termosifones: influencia de las propiedades termofísicas del fluido de trabajo* (Doctoral dissertation, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea).
- Aporta, C. H., Martínez, P. E., & Pasquevich, D. M. (2011). Estudio de los ciclos termoquímicos para la producción de hidrógeno nuclear. *Inst. Energía y Desarrollo Sostenible. Com. Nac. Energía Atómica*, 5-13.
- Balat-Pichelin, M., Sans, J., & Bêche, E. (2022). Spectral directional and total hemispherical emissivity of virgin and oxidized 316L stainless steel from 1000 to 1650 K. *Infrared Physics & Technology*, 123, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104156>
- Baykara, S. (2004). Experimental solar water thermolysis. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 29(14), 1459-1469. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.011>
- Bejan, A., & Almgöbel, M. (2000). Constructal T-shaped fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(12), 2101–2115. [https://doi.org/10.1016/s0017-9310\(99\)00283-5](https://doi.org/10.1016/s0017-9310(99)00283-5)
- Bilgen, E., Ducarroir, M., Foex, M., Sibieude, F., & Trombe, F. (1977). Use of solar energy for direct and two-step water decomposition cycles☆. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 2(3), 251-257. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(77\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0360-3199(77)90021-0)
- Brown, L., Besenbruch, G., Lentsch, R., Schultz, K., Funk, J., Pickard, P., Marshall, A., & Showalter, S. (2003). *HIGH EFFICIENCY GENERATION OF HYDROGEN FUELS USING NUCLEAR POWER*. <https://doi.org/10.2172/814014>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana.

- Ciclos termoquímicos de división del agua: una tecnología prometedora para convertir la luz solar y el calor residual en hidrógeno verde.* (s. f.). CIC energiGUNE.
<https://cicenergigune.com/es/blog/twsc-ciclos-termoquimicos-division-agua-convertir-luz-solar-y-calor-residual-hidrogeno-verde>
- Kraus, A., Aziz, A., Welty, J., & Sekulic, D. (2001). Extended surface heat transfer. *Applied Mechanics Reviews*, 54(5), B92. <https://doi.org/10.1115/1.1399680>
- Lede, J., Lopicque, F., Villiermaux, J., Cales, B., Ounalli, A., Baumard, J., & Anthony, A. (1982). Production of hydrogen by direct thermal decomposition of water: Preliminary investigations. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 7(12), 939-950.
[https://doi.org/10.1016/0360-3199\(82\)90162-8](https://doi.org/10.1016/0360-3199(82)90162-8)
- López Quijano, C. S. El método de termólisis como tratamiento de residuos sólidos urbanos.
- Millholland, C. D., & Millholland, C. D. (2021, 29 junio). Uso industrial de catalizadores. *Ciencia Acelerada*. <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/materiales/uso-industrial-de-catalizadores/>
- Perret, R. (2011). *Solar Thermochemical Hydrogen Production Research (STCH) Thermochemical Cycle Selection and Investment Priority* (No. SAND2011-1141P). Sandia National Lab.(SNL-CA), Livermore, CA (United States).
- Piqué, J. L. (2010). El hidrógeno y nuestro futuro energético. En *Universitat Politècnica de Catalunya eBooks*. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498804287>
- Rashid, M. M., Al Mesfer, M. K., Naseem, H., & Danish, M. (2015). Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. *Int. J. Eng. Adv. Technol*, 4(3), 2249-8958.

Thomas, D., Kumar, G., Ghuge, N., Singh, K., Mukhopadhyay, S., & Shenoy, K. (2023). Heat transfer characteristics and design aspects of thermolysis reactor in copper-chlorine thermochemical water splitting cycle. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 48(88), 34286-34298. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.243>

Wajda, T., & Gabriel, K. (2019). Thermolysis reactor scale-up for pilot scale Cu Cl hybrid hydrogen production. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 44(20), 9779-9790. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.187>

Apéndices

Apéndice a Propiedades del agua saturada

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpia de vaporización, h _g , kJ/kg	Calor específico, c _p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 185	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

Apéndice b Propiedades de gases a 1 atm

TABLA A-16

Propiedades de gases a la presión de 1 atm (conclusión)

Temp., <i>T</i> , °C	Densidad, <i>ρ</i> , kg/m ³	Calor específico, <i>c_p</i> , J/kg · K	Conductividad térmica, <i>k</i> , W/m · K	Difusividad térmica, <i>α</i> , m ² /s	Viscosidad dinámica, <i>μ</i> , kg/m · s	Viscosidad cinemática, <i>ν</i> , m ² /s	Número de Prandtl, <i>Pr</i>
<i>Nitrógeno, N₂</i>							
-50	1.5299	957.3	0.02001	1.366 × 10 ⁻⁵	1.390 × 10 ⁻⁵	9.091 × 10 ⁻⁶	0.6655
0	1.2498	1 035	0.02384	1.843 × 10 ⁻⁵	1.640 × 10 ⁻⁵	1.312 × 10 ⁻⁵	0.7121
50	1.0564	1 042	0.02746	2.494 × 10 ⁻⁵	1.874 × 10 ⁻⁵	1.774 × 10 ⁻⁵	0.7114
100	0.9149	1 041	0.03090	3.244 × 10 ⁻⁵	2.094 × 10 ⁻⁵	2.289 × 10 ⁻⁵	0.7056
150	0.8068	1 043	0.03416	4.058 × 10 ⁻⁵	2.300 × 10 ⁻⁵	2.851 × 10 ⁻⁵	0.7025
200	0.7215	1 050	0.03727	4.921 × 10 ⁻⁵	2.494 × 10 ⁻⁵	3.457 × 10 ⁻⁵	0.7025
300	0.5956	1 070	0.04309	6.758 × 10 ⁻⁵	2.849 × 10 ⁻⁵	4.783 × 10 ⁻⁵	0.7078
400	0.5072	1 095	0.04848	8.727 × 10 ⁻⁵	3.166 × 10 ⁻⁵	6.242 × 10 ⁻⁵	0.7153
500	0.4416	1 120	0.05358	1.083 × 10 ⁻⁴	3.451 × 10 ⁻⁵	7.816 × 10 ⁻⁵	0.7215
1 000	0.2681	1 213	0.07938	2.440 × 10 ⁻⁴	4.594 × 10 ⁻⁵	1.713 × 10 ⁻⁴	0.7022
1 500	0.1925	1 266	0.11793	4.839 × 10 ⁻⁴	5.562 × 10 ⁻⁵	2.889 × 10 ⁻⁴	0.5969
2 000	0.1502	1 297	0.18590	9.543 × 10 ⁻⁴	6.426 × 10 ⁻⁵	4.278 × 10 ⁻⁴	0.4483
<i>Oxígeno, O₂</i>							
-50	1.7475	984.4	0.02067	1.201 × 10 ⁻⁵	1.616 × 10 ⁻⁵	9.246 × 10 ⁻⁶	0.7694
0	1.4277	928.7	0.02472	1.865 × 10 ⁻⁵	1.916 × 10 ⁻⁵	1.342 × 10 ⁻⁵	0.7198
50	1.2068	921.7	0.02867	2.577 × 10 ⁻⁵	2.194 × 10 ⁻⁵	1.818 × 10 ⁻⁵	0.7053
100	1.0451	931.8	0.03254	3.342 × 10 ⁻⁵	2.451 × 10 ⁻⁵	2.346 × 10 ⁻⁵	0.7019
150	0.9216	947.6	0.03637	4.164 × 10 ⁻⁵	2.694 × 10 ⁻⁵	2.923 × 10 ⁻⁵	0.7019
200	0.8242	964.7	0.04014	5.048 × 10 ⁻⁵	2.923 × 10 ⁻⁵	3.546 × 10 ⁻⁵	0.7025
300	0.6804	997.1	0.04751	7.003 × 10 ⁻⁵	3.350 × 10 ⁻⁵	4.923 × 10 ⁻⁵	0.7030
400	0.5793	1 025	0.05463	9.204 × 10 ⁻⁵	3.744 × 10 ⁻⁵	6.463 × 10 ⁻⁵	0.7023
500	0.5044	1 048	0.06148	1.163 × 10 ⁻⁴	4.114 × 10 ⁻⁵	8.156 × 10 ⁻⁵	0.7010
1 000	0.3063	1 121	0.09198	2.678 × 10 ⁻⁴	5.732 × 10 ⁻⁵	1.871 × 10 ⁻⁴	0.6986
1 500	0.2199	1 165	0.11901	4.643 × 10 ⁻⁴	7.133 × 10 ⁻⁵	3.243 × 10 ⁻⁴	0.6985
2 000	0.1716	1 201	0.14705	7.139 × 10 ⁻⁴	8.417 × 10 ⁻⁵	4.907 × 10 ⁻⁴	0.6873
<i>Vapor de agua, H₂O</i>							
-50	0.9839	1 892	0.01353	7.271 × 10 ⁻⁶	7.187 × 10 ⁻⁶	7.305 × 10 ⁻⁶	1.0047
0	0.8038	1 874	0.01673	1.110 × 10 ⁻⁵	8.956 × 10 ⁻⁶	1.114 × 10 ⁻⁵	1.0033
50	0.6794	1 874	0.02032	1.596 × 10 ⁻⁵	1.078 × 10 ⁻⁵	1.587 × 10 ⁻⁵	0.9944
100	0.5884	1 887	0.02429	2.187 × 10 ⁻⁵	1.265 × 10 ⁻⁵	2.150 × 10 ⁻⁵	0.9830
150	0.5189	1 908	0.02861	2.890 × 10 ⁻⁵	1.456 × 10 ⁻⁵	2.806 × 10 ⁻⁵	0.9712
200	0.4640	1 935	0.03326	3.705 × 10 ⁻⁵	1.650 × 10 ⁻⁵	3.556 × 10 ⁻⁵	0.9599
300	0.3831	1 997	0.04345	5.680 × 10 ⁻⁵	2.045 × 10 ⁻⁵	5.340 × 10 ⁻⁵	0.9401
400	0.3262	2 066	0.05467	8.114 × 10 ⁻⁵	2.446 × 10 ⁻⁵	7.498 × 10 ⁻⁵	0.9240
500	0.2840	2 137	0.06677	1.100 × 10 ⁻⁴	2.847 × 10 ⁻⁵	1.002 × 10 ⁻⁴	0.9108
1 000	0.1725	2 471	0.13623	3.196 × 10 ⁻⁴	4.762 × 10 ⁻⁵	2.761 × 10 ⁻⁴	0.8639
1 500	0.1238	2 736	0.21301	6.288 × 10 ⁻⁴	6.411 × 10 ⁻⁵	5.177 × 10 ⁻⁴	0.8233
2 000	0.0966	2 928	0.29183	1.032 × 10 ⁻³	7.808 × 10 ⁻⁵	8.084 × 10 ⁻⁴	0.7833

Apéndice c Ecuaciones para la prueba #1 ($T_b = 700K$ y $T_\infty = 500K$)

$$q_{total} = 48382 \text{ W/m}^2$$

$$q = \frac{48382 \text{ W/m}^2 \cdot 0,262 \text{ m}}{12} = 1056,34 \text{ W/m}$$

Aleta principal

$$151,5^{\frac{4}{3}} = 133^{\frac{4}{3}} + 23,51 \cdot 151,5^{\frac{1}{3}}$$

$$\theta_s = 0,7 \text{ o } 0,9$$

$$\theta_s = 0,7 = \frac{500}{700}$$

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(700)^3}{151,5} = 0,08$$

$$\zeta_1 = 0,13$$

$$\zeta_2 = 1,52$$

$$n_{aleta} = 0,68$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,52)(22,33)}{2(151,5)} = 0,11$$

$$q_{id} = \frac{1056,34 \text{ (diviendo en 12)}}{0,68} = 1553,44 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{1553,44}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(700^4 - 500^4) + 151,5(700 - 500)]} = 0,02128 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,00411 \text{ m}$$

Corrigiendo $b = 0,02128 * 0,39 = 0,0083$

Rama #1

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(560)^3}{151,5} = 0,04$$

$$\theta_s = \frac{500}{560} = 0,9$$

$$\zeta_1 = 0,07$$

$$\zeta_2 = 1,75$$

$$n_{aleta} = 0,65$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,75)(22,33)}{2(151,5)} = 0,1289 \text{ m}$$

$$q_{id} = \frac{1056/5}{0,65} = 325 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{325,02}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(560^4 - 500^4) + 151,5(560 - 500)]} = 0,0157 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,019122 \text{ m}$$

Corregir $b=0,0157 * 0,327 = 0,00513 \text{ m}$

Rama #2

$$q_{id} = \frac{211,2/5}{0,65} = 64,9846 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{64,9846}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(560^4 - 500^4) + 151,5(560 - 500)]} = 0,0031426 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,00076617 \text{ m}$$

Corregir $b=0,00314 * 0,5059 = 0,001589 \text{ m}$

Apéndice d Ecuaciones para la prueba #2 ($T_b = 900\text{K}$ y $T_\infty = 630\text{K}$)

$$q_{total} = 84437 \text{ W/m}^2$$

$$q = \frac{84437 \text{ W/m}^2 * 0,262 \text{ m}}{12} = 1843,54 \text{ W/m}$$

Aleta principal

$$166,19^{\frac{4}{3}} = 133,5^{\frac{4}{3}} + 42,09 \cdot 166,19^{\frac{1}{3}}$$

$$\theta_s = 0,7 \text{ o } 0,9$$

$$\theta_s = 0,7 = \frac{900}{630}$$

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(900)^3}{166,19} = 0,1528$$

$$\zeta_1 = 0,21$$

$$\zeta_2 = 1,38$$

$$n_{aleta} = 0,68$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,38)(22,33)}{2(166,19)} = 0,092711$$

$$q_{id} = \frac{1843,54 \text{ (diviendo en 12)}}{0,68} = 2711,08 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{2711,088}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(900^4 - 630^4) + 169,19(900 - 630)]} = 0,02177 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,00511 \text{ m}$$

Corriendo $b=0,02177 * 0,39 = 0,0085$

Rama #1

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(700)^3}{166,19} = 0,0719$$

$$\theta_s = \frac{700}{630} = 0,9$$

$$\zeta_1 = 0,12$$

$$\zeta_2 = 1,61$$

$$n_{aleta} = 0,66$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,61)(22,33)}{2(166,19)} = 0,1081 \text{ m}$$

$$q_{id} = \frac{1843,54/5}{0,66} = 542,21 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{542,21}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(700^4 - 630^4) + 166,19(700 - 630)]} = 0,01868 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,00322 \text{ m}$$

Corregir $b=0,01868 * 0,327 = 0,0061 \text{ m}$

Rama #2

$$q_{id} = \frac{542,21/5}{0,66} = 111,7296 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{111,7296}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(700^4 - 630^4) + 166,19(700 - 630)]} = 0,003849 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,0015979 \text{ m}$$

Corregir $b=0,003849 * 0,5059 = 0,001947 \text{ m}$

Apéndice e Ecuaciones para la prueba #3 ($T_b = 1100\text{K}$ y $T_\infty = 770\text{K}$)

$$q_{total} = 132860 \text{ W/m}^2$$

$$q = \frac{132860 \text{ W/m}^2 * 0,262 \text{ m}}{12} = 2900,77 \text{ W/m}$$

Aleta principal

$$192,016^{\frac{4}{3}} = 137,3^{\frac{4}{3}} + 69,24 \cdot 192,016^{\frac{1}{3}}$$

$$\theta_s = 0,7 \text{ o } 0,9$$

$$\theta_s = 0,7 = \frac{770}{1100}$$

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(1100)^3}{192,016} = 0,2415$$

$$\zeta_1 = 0,29$$

$$\zeta_2 = 1,17$$

$$n_{aleta} = 0,61$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,17)(22,33)}{2(192,016)} = 0,06664$$

$$q_{id} = \frac{2900,77 \text{ (diviendo en 12)}}{0,61} = 4755,36 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{4755,36}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(1100^4 - 770^4) + 192,016(1100 - 770)]} = 0,0232 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,00807 \text{ m}$$

Corriendo $b=0,0232 * 0,39 = 0,009048$

Rama #1

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(855)^3}{192,016} = 0,113$$

$$\theta_s = \frac{855}{770} = 0,9$$

$$\zeta_1 = 0,17$$

$$\zeta_2 = 1,5$$

$$n_{aleta} = 0,67$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,5)(22,33)}{2(196,016)} = 0,0872 \text{ m}$$

$$q_{id} = \frac{2900,77/5}{0,67} = 865,901 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{865,901}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(855^4 - 770^4) + 192,016(855 - 770)]} = 0,01907 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,0041704 \text{ m}$$

Corregir $b=0,01907 * 0,327 = 0,006235 \text{ m}$

Rama #2

$$q_{id} = \frac{580,154/5}{0,67} = 173,1802 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{173,1802}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(855^4 - 770^4) + 192,016(855 - 770)]} = 0,003815 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,001669 \text{ m}$$

Corregir $b=0,00314 * 0,5059 = 0,00193 \text{ m}$

Apéndice f Ecuaciones para la prueba #4 ($T_b = 1000\text{K}$ y $T_\infty = 700\text{K}$)

$$q_{total} = 106802 \text{ W/m}^2$$

$$q = \frac{106802 \text{ W/m}^2 * 0,262 \text{ m}}{12} = 2331,84 \text{ W/m}$$

Aleta principal

$$179,95^{\frac{4}{3}} = 135,1^{\frac{4}{3}} + 54,49 \cdot 179,95^{\frac{1}{3}}$$

$$\theta_s = 0,7 \text{ o } 0,9$$

$$\theta_s = 0,7 = \frac{700}{1000}$$

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(1000)^3}{179,95} = 0,1936$$

$$\zeta_1 = 0,24$$

$$\zeta_2 = 1,24$$

$$n_{aleta} = 0,66$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,24)(22,33)}{2(179,95)} = 0,0769$$

$$q_{id} = \frac{2331,843 \text{ (diviendo en 12)}}{0,66} = 3533,095 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{3533,095}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(1000^4 - 700^4) + 179,95(1000 - 700)]} = 0,02195 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,006265 \text{ m}$$

Corriendo $b=0,02195 * 0,39 = 0,00856$

Rama #1

$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{(0,6146)(5,67 \times 10^{-8})(777)^3}{179,95} = 0,0908 \text{ m}$$

$$\theta_s = \frac{777}{1000} = 0,777$$

$$\zeta_1 = 0,14$$

$$\zeta_2 = 1,54$$

$$n_{aleta} = 0,66$$

$$\frac{b^2}{\delta} = \frac{(1,54)(22,33)}{2(179,95)} = 0,09554 \text{ m}$$

$$q_{id} = \frac{2331,843/5}{0,66} = 706,619 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{706,619}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(777^4 - 700^4) + 179,95(777 - 700)]} = 0,0194 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,00393 \text{ m}$$

Corregir $b=0,0194 * 0,327 = 0,00614 \text{ m}$

Rama #2

$$q_{id} = \frac{466,3686/5}{0,66} = 141,323 \text{ w/m}$$

$$b = \frac{141,323}{2[0,6146(5,67 \times 10^{-8})(777^4 - 700^4) + 179,95(777 - 700)]} = 0,003884 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{b^2}{\frac{b^2}{\delta}} = 0,001578 \text{ m}$$

Corregir $b=0,003884 * 0,5059 = 0,00196 \text{ m}$

Apéndice g Iteración aleta en T

Simulacion	L_0	L_1	t_0	t_1	alpha	phi	q_barra	T en punta	L_1/l_0	t_1/t_0
1	0,03	0,01002	0,002499	0,009	0,6693	0,3994	0,06082	359,2	0,334	3,601441
2	0,03	0,01109	0,002338	0,008996	0,6866	0,3607	0,05859	351,7	0,369667	3,847733
3	0,03	0,01201	0,002202	0,008992	0,7003	0,3333	0,05772	346,2	0,400333	4,08356
4	0,03	0,01301	0,002051	0,009	0,7144	0,3077	0,05687	360,3	0,433667	4,388103
5	0,02853	0,014	0,002	0,009	0,7186	0,3006	0,0556	368,2	0,490712	4,5
6	0,02628	0,015	0,002	0,009	0,7163	0,3046	0,05418	376,7	0,570776	4,5
7	0,02403	0,016	0,002	0,009	0,7118	0,3123	0,05229	391	0,665834	4,5
8	0,02178	0,017	0,002	0,009	0,7051	0,3243	0,0517	408,4	0,780533	4,5
9	0,01953	0,018	0,002	0,009	0,696	0,3415	0,05053	438,2	0,921659	4,5
10	0,01886	0,019	0,002	0,008668	0,6994	0,3351	0,04939	431,2	1,007423	4,334
11	0,01969	0,02	0,002	0,008067	0,7161	0,3048	0,04854	344,8	1,015744	4,0335
12	0,019	0,008417	0,002996	0,015	0,5716	0,7507	0,09094	643,3	0,443	5,006676
13	0,01899	0,009026	0,002995	0,014	0,5816	0,7505	0,08232	595,8	0,475303	4,674457
14	0,019	0,009928	0,002923	0,013	0,5957	0,6354	0,07378	593,9	0,522526	4,447485
15	0,019	0,01052	0,002998	0,012	0,6044	0,6009	0,06731	516,8	0,553684	4,002668
16	0,01895	0,01154	0,002986	0,011	0,6181	0,549	0,06054	525,5	0,608971	3,683858
17	0,01899	0,01154	0,002982	0,011	0,6184	0,5481	0,06067	546,1	0,607688	3,688799
18	0,019	0,01297	0,002907	0,01	0,6368	0,4847	0,05475	575,3	0,682632	3,439972
19	0,015	0,009	0,002	0,008	0,5479	0,4859	0,04835	573,4	0,6	4
20	0,01599	0,007508	0,003751	0,016	0,5321	0,9999	0,09868	660	0,469543	4,265529