

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE  
VAPOR DE UNA PLANTA DE ALIMENTOS  
ANÁLISIS DEL SISTEMA EN ESTADO ESTABLE**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO/A EN INGENIERÍA  
MECÁNICA**

**MATHEO JAVIER PAREDES CHASI**

**matheo.paredes@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA Ph.D.**

**jose.palacios@epn.edu.ec**

**DMQ, diciembre 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Matheo Javier Paredes Chasi declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**Matheo Paredes**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Matheo Javier Paredes Chasi, bajo mi supervisión.

---

**José Luis Palacios**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MATHEO PAREDES

JOSÉ LUIS PALACIOS

## DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis padres Paco y Maribel, y a mis hermanos Hanny y Paco, quienes han sido los principales testigos de todo el esfuerzo que me ha costado llegar hasta este punto, y también los responsables de que no haya desmayado en el camino, pues siempre estuvieron para ayudar a levantarme con la frente en alto de cualquier adversidad.

A mis padres, porque han sido mi mayor ejemplo de que, en la vida, hacer las cosas con responsabilidad, dedicación y amor, es la mejor forma de hacerlas; y porque siempre estuvieron velando por mi bienestar, y se han esforzado incansablemente, con cuerpo y alma, por ayudarme a cumplir con este sueño.

A mis hermanos porque siempre estuvieron para sacarme una sonrisa en los momentos que más necesité, y porque me dieron la motivación necesaria al hacerme sentir que mis logros son sus logros también.

Por cada palabra de aliento, por cada acto de amor, por cada ocasión en la que me demostraron que no estoy solo y que jamás lo estaré.

A ustedes querida familia, con mucho amor.

## **AGRADECIMIENTO**

Un agradecimiento especial a mi familia, que han estado para mí siempre de manera incondicional, en cada paso de mi vida.

Agradezco al Ing. José Luis Palacios, por haber compartido sus conocimientos para el desarrollo de este proyecto, por todo el tiempo dedicado en la dirección de este, y por la buena predisposición que siempre tuvo para solventar cualquier problema, o impartir algún consejo.

Agradezco también al Ing. Juan Carlos Almachi, por la apertura ofrecida para ayudarnos a sacar adelante este proyecto, por sus valiosos consejos, y por haber compartido sus conocimientos y su tiempo de la manera más amable.

Y en general, quiero agradecer a todos quienes aportaron con su granito de arena en el desarrollo de este proyecto.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
Matheo Paredes .....	I
Jose Luis Palacios .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
RESUMEN .....	IX
ABSTRACT .....	X
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico .....	2
1.4.1 Introducción.....	2
1.4.2 Sistemas de vapor.....	3
1.4.3 Uso de vapor en una planta de alimentos .....	6
1.4.4 Funcionamiento de una planta en estado estable .....	6
1.4.5 Modelado y simulación de sistemas .....	7
1.4.6 Wolfram System Modeler .....	7
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Revisión bibliográfica .....	12
2.2 Determinación de los componentes y condiciones del sistema .....	12
2.2.1 Componentes que conforman el sistema de vapor.....	12
2.2.2 Condiciones de trabajo de los componentes .....	13
2.4 Modelación del Sistema .....	14
2.4.1 Elementos del software a ser utilizados.....	14
2.4.2 Configuración de los componentes para la simulación .....	15
2.4.2.1 Bomba de alimentación de agua .....	16
2.4.2.2 Caldera.....	17
2.4.2.3 Válvula de paso .....	20

2.4.2.4	Marmita .....	22
2.4.2.5	Horno .....	26
2.5	Simulación del Sistema .....	29
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	30
3.1	Resultados obtenidos.....	30
3.1.1	Resultados obtenidos con la marmita como consumidor de vapor. ....	30
3.1.2	Resultados obtenidos con el horno como consumidor de vapor .....	33
3.1.3	Validación de resultados .....	36
3.2	Conclusiones .....	38
3.3	Recomendaciones .....	39
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
5	ANEXOS .....	41
5.1	ANEXO 1: Modelamiento y simulación de la Marmita en el software COMSOL Multiphysics .....	41
5.2	ANEXO 2: Modelamiento y simulación del horno en el software COMSOL Multiphysics .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación de un sistema de vapor .....	3
<b>Figura 2.</b> Caldera pirotubular .....	4
<b>Figura 3.</b> Caldera acuotubular .....	4
<b>Figura 4.</b> Sección de un sistema de distribución .....	5
<b>Figura 5.</b> Modelo de una caldera, existente dentro de la librería “Fluid” .....	10
<b>Figura 6.</b> Metodología por seguir.....	11
<b>Figura 7.</b> Sistema de control del flujo de agua que entra a la caldera. ....	17
<b>Figura 8.</b> Modelado de la fuente de calor de la caldera. ....	20
<b>Figura 9.</b> Modelado de la válvula.....	22
<b>Figura 10.</b> Dimensiones en milímetros del serpentín de la marmita .....	23
<b>Figura 11.</b> Modelado de la marmita .....	26
<b>Figura 12.</b> Modelado del horno.....	28
<b>Figura 13.</b> Volumen de agua en la Caldera a lo largo del tiempo con la marmita como consumidor de vapor. ....	30
<b>Figura 14.</b> Flujo de calor que sale del quemador con la marmita como consumidor de vapor.....	31
<b>Figura 15.</b> Flujo de vapor saliente de la caldera a lo largo del tiempo con la marmita como consumidor de vapor. ....	31
<b>Figura 16.</b> Apertura de la válvula en función del tiempo con la marmita como consumidor de vapor. ....	32
<b>Figura 17.</b> Variación de la temperatura del agua dentro de la marmita. ....	32
<b>Figura 18.</b> Flujo de vapor por el serpentín a lo largo del tiempo con la marmita como consumidor de vapor. ....	33
<b>Figura 19.</b> Volumen de agua en la Caldera a lo largo del tiempo con el horno como consumidor de vapor. ....	33
<b>Figura 20.</b> Flujo de calor que sale del quemador con el horno como consumidor de vapor.....	34
<b>Figura 21.</b> Flujo de vapor saliente de la caldera a lo largo del tiempo con el horno como consumidor de vapor.....	34
<b>Figura 22.</b> Apertura de la válvula en función del tiempo con el horno como consumidor de vapor.....	35
<b>Figura 23.</b> Variación de la temperatura del aire del horno a lo largo del tiempo .....	35
<b>Figura 24.</b> Flujo de vapor por el tubo de inyección a lo largo del tiempo .....	36
<b>Figura 25.</b> Selección de la dimensión del espacio.....	41
<b>Figura 26.</b> Selección de la física del modelo .....	42
<b>Figura 27.</b> Selección del estudio .....	42
<b>Figura 28.</b> Geometrías generadas para la simulación de la marmita.....	43
<b>Figura 29.</b> Área de control para el flujo laminar. ....	44
<b>Figura 30.</b> Configuración del módulo de Transferencia de calor.....	45
<b>Figura 31.</b> Creación del mallado del modelo. ....	45
<b>Figura 32.</b> Configuración del “Estudio 1” .....	45
<b>Figura 33.</b> Selección de puntos para obtención de datos. ....	46
<b>Figura 34.</b> Puntos de análisis de temperatura en la marmita .....	47
<b>Figura 35.</b> Geometrías generadas para la simulación del horno .....	47
<b>Figura 36.</b> Materiales utilizados para el modelo .....	48
<b>Figura 37.</b> Área de control para el flujo laminar .....	48
<b>Figura 38.</b> Configuración del módulo de transferencia de calor .....	48
<b>Figura 39.</b> Configuración del mallado del modelo.....	49
<b>Figura 40.</b> Puntos de análisis de temperatura en el horno .....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Comparación entre Wolfram System Modeler, MapleSim y Simulink .....	8
<b>Tabla 2.</b> Condiciones de trabajo de la caldera .....	13
<b>Tabla 3.</b> Condiciones de trabajo para la marmita .....	13
<b>Tabla 4.</b> Condiciones de trabajo para el horno .....	14
<b>Tabla 5.</b> Elementos del software, utilizados para modelar el sistema de vapor .....	14
<b>Tabla 6.</b> Configuración de parámetros en la caldera.....	17
<b>Tabla 7.</b> Señales de encendido y apagado del quemador con la marmita como consumidor de vapor. ....	19
<b>Tabla 8.</b> Señales de encendido y apagado del quemador con el horno como consumidor de vapor .....	19
<b>Tabla 9.</b> Señales de abierto y cerrado de la válvula con la marmita como consumidor de vapor .....	21
<b>Tabla 10.</b> Señales de abierto y cerrado de la válvula con el horno como consumidor de vapor .....	21
<b>Tabla 11.</b> Configuración de parámetros para el serpentín .....	22
<b>Tabla 12.</b> Configuración de parámetros para la cámara de la marmita.....	24
<b>Tabla 13.</b> Valores de h para cada etapa del proceso de cocción con la marmita como consumidor de vapor. ....	24
<b>Tabla 14.</b> Temperatura de la comida en cada etapa del proceso de cocción con la marmita como consumidor de vapor .....	25
<b>Tabla 15.</b> Configuración de parámetros para la tubería de inyección de calor hacia el horno .	26
<b>Tabla 16.</b> Configuración de parámetros para la cámara del horno.....	27
<b>Tabla 17.</b> Valores de h para cada etapa del proceso de cocción con el horno como consumidor de vapor. ....	27
<b>Tabla 18.</b> Temperatura de la comida en cada etapa del proceso de cocción con el horno como consumidor de vapor .....	28
<b>Tabla 19.</b> Error entre los datos simulados y los documentados, con la marmita como consumidor de vapor. ....	36
<b>Tabla 20.</b> Error entre los tiempos de cocción simulados y los documentados, con el horno como consumidor de vapor. ....	37
<b>Tabla 21.</b> Propiedades del Acero AISI 316.....	43
<b>Tabla 22.</b> Propiedades del Jamón .....	43
<b>Tabla 23.</b> Propiedades del Agua.....	44
<b>Tabla 24.</b> Tiempos de los procesos de calentamiento y enfriamiento en la marmita .....	46

## RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular desarrolla el modelado y simulación de los principales componentes de un sistema de vapor, que funciona en una planta de producción de alimentos, mediante el uso del software Wolfram System Modeler.

Debido a la actual demanda de optimización de procesos industriales en los que intervienen los sistemas energéticos, se ha decidido crear una representación virtual de un sistema de vapor que trabaja en una planta de producción de alimentos, mediante el uso de un programa de modelamiento y simulación multifísico, como es Wolfram System Modeler, para analizar la validez de los resultados arrojados por esta herramienta. Esto con el fin de evaluar el alcance y limitaciones del programa, y decidir si es fiable para futuras simulaciones que busquen estudiar estos procesos de optimización en cuestión.

Lo mencionado anteriormente se logró mediante una revisión bibliográfica sobre el funcionamiento de los sistemas de vapor, y el comportamiento de los elementos que los componen al trabajar en conjunto; y también, una revisión de documentación sobre el funcionamiento del software y el proceso de modelado.

Una vez revisada la información necesaria, se crea el modelo del sistema de vapor, y los datos obtenidos de la simulación se los comparó con los valores de un sistema real, presentados en la bibliografía revisada, para de esa manera validar los resultados arrojados por el programa.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema de vapor, Modelamiento, Simulación.

## **ABSTRACT**

The present Curricular Integration Project develops the modeling and simulation of the main components of a steam system, which operates in a food production plant, using the Wolfram System Modeler software.

Due to the current demand for optimization of industrial processes involving energy systems, it was decided to create a virtual representation of a steam system that works in a food production plant, using a multiphysics modeling and simulation program such as Wolfram System Modeler, to analyze the validity of the results produced by this tool. This aims to evaluate the scope and limitations of the program and decide whether it is reliable for future simulations that seek to study these optimization processes in question.

The aforementioned was achieved through a bibliographic review on the operation of steam systems and the behavior of the elements that compose them when working together; and also, a review of documentation on the operation of the software and the modeling process.

Once the necessary information was reviewed, the steam system model was created, and the data obtained from the simulation were compared with the values of a real system, presented in the reviewed bibliography, in order to validate the results produced by the program.

**KEYWORDS:** Steam System, Modeling, Simulation.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Los sistemas de vapor se han vuelto muy importantes en el sector industrial en estos días, y tienen un uso muy diverso. Varias industrias utilizan la generación de vapor para poner a producir sus plantas, debido a que el vapor cumple con características únicas, que permiten el transporte de la energía con pérdidas energéticas mínimas y costos reducidos, en comparación con otros fluidos. Además, con el vapor se obtiene elevados coeficientes de transferencia de calor, y en los procesos se puede controlar de mejor manera la temperatura [1].

En este trabajo se realiza el estudio de una planta de alimentos que trabaja con sistemas de vapor en estado estable, para de esta manera observar el comportamiento de los componentes que la conforman, considerando un ambiente ideal, en el que factores externos no alteren el desarrollo normal de los mismos. De este modo se pretende encontrar la configuración que deben tener sus componentes, para crear una representación virtual, mediante herramientas de modelación, con el objetivo de simular su comportamiento.

La metodología para la obtención de resultados consiste en realizar una previa revisión bibliográfica, donde se describa los sistemas de vapor y el principio de su funcionamiento. Posteriormente se relacionará esa información con la aplicación que tienen estos sistemas en las plantas de alimentos, y finalmente, comprender el comportamiento de estas. Revisar también documentación que ayude en la comprensión del uso del software Wolfram System Modeler, y así poder utilizar de forma óptima las herramientas de modelación y simulación, que vienen incluidas en este.

Una vez comprendidos los procesos del sistema de vapor y el uso del software, se procede a seleccionar una planta real de la que se extraerán todos los parámetros necesarios, para configurar el modelo y generar la representación virtual del sistema de vapor.

Finalmente, con los datos obtenidos en la parte de modelamiento y simulación, se aplica una metodología que permite validar los resultados obtenidos, y así garantizar que las conclusiones a las que se llegó estén lo más cerca de la realidad posible. Esta metodología consiste en comparar los resultados obtenidos, con los valores reales de la planta de alimentos de la que se obtuvieron los parámetros para el modelado y las condiciones iniciales, para verificar que exista coherencia entre ambos.

## **1.1 Objetivo general**

Realizar una modelación y simulación del sistema de vapor de una planta industrial de alimentos en estado estable.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los sistemas de vapor, el funcionamiento de una planta que trabaja con sistemas de vapor, y el requerimiento energético.
- Investigar y comprender el funcionamiento del software Wolfram System Modeler, para poder modelar y simular un sistema de vapor de una planta de alimentos.
- Seleccionar los parámetros y componentes a ser controlados y determinar las condiciones iniciales, bajo las que el sistema en estado estable será simulado.
- Modelar el sistema en estado estable
- Simular el sistema en estado estable
- Validar los resultados obtenidos

## **1.3 Alcance**

En este Trabajo de Integración Curricular, mediante una revisión bibliográfica, se pretende identificar los componentes y parámetros que se deben controlar para el correcto funcionamiento de una planta industrial de producción de alimentos, que opera en estado estable con sistemas de vapor. Luego, mediante un software de simulación, reproducir un modelo virtual del sistema mencionado, y analizar el comportamiento de sus componentes en función del tiempo.

Posteriormente, se aplicará una metodología que permita validar los resultados obtenidos mediante la simulación, para verificar la fiabilidad del modelo creado.

## **1.4 Marco teórico**

En esta sección se tratarán los conceptos fundamentales que ayudarán a comprender el contexto del trabajo, dentro del campo de estudio.

### **1.4.1 Introducción**

Actualmente, los sistemas de vapor operan en la mayoría de las industrias intensivas de energía (industrias que procesan alimentos, papel, pulpas, productos químicos, refinan petróleo y metales primarios) [2].

En Estados Unidos, el 37% de los combustibles fósiles que se queman en las industrias, son utilizados para generar vapor. En las industrias de procesamiento de alimentos específicamente, se dedica el 57% del consumo de combustibles fósiles en la generación de vapor para el funcionamiento de sus plantas [2]. De manera que, esta priorización de las proporciones de combustible hacia los sistemas de vapor, muestran la gran importancia que tienen en el sector industrial. De ahí que exista gran interés en el sector ingenieril, de encontrar formas de maximizar

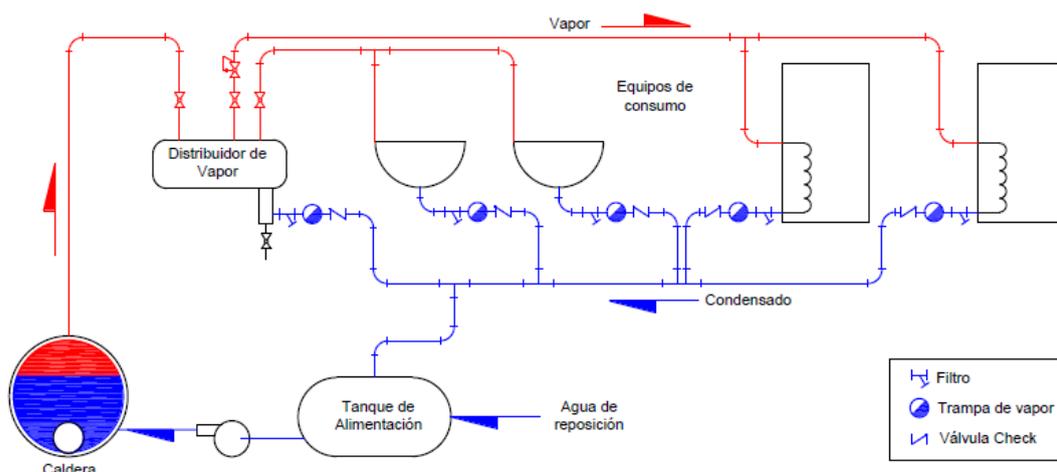
la eficiencia de estos sistemas, y minimizar el consumo de combustible, con la finalidad de reducir los costos de producción y el impacto ambiental.

Un método de desarrollo ingenieril, para la experimentación con sistemas físicos industriales, que ha venido tomando fuerza con el paso del tiempo, por la optimización de recursos, y la efectividad de sus resultados, es la modelación y simulación. Es por eso que en este trabajo se pretende modelar y simular el comportamiento del sistema de vapor que funciona en una planta de producción de alimentos, para identificar el alcance y las limitaciones que tiene el software en cuestión, para futuros estudios.

### 1.4.2 Sistemas de vapor

Un sistema de vapor, explicado de forma sencilla, es un conjunto de componentes que trabajan simultáneamente, con la finalidad de generar vapor que aporte con energía térmica, para poner a funcionar máquinas.

Estos componentes se pueden sub agrupar en tres subsistemas: generación de vapor, distribución de vapor y retorno de condensado, y uso de vapor, como se muestra en la Figura 1 [3].



**Figura 1.** Representación de un sistema de vapor

**Fuente:** [4]

#### Generación de Vapor

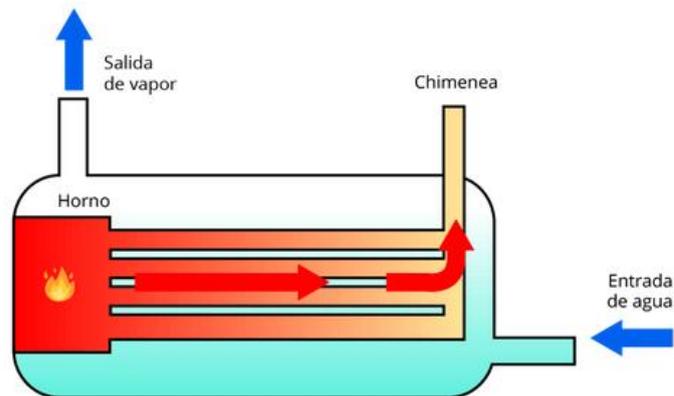
Este subsistema está compuesto por calderas, tuberías de alimentación de agua, componentes para alimentación de combustible, bombas, componentes para tratamiento de agua, componentes de purga, etc. [3]. Sin embargo, uno de los componentes más importante de esta sección, y del sistema de vapor como tal, en el que hay que hacer énfasis, es la caldera, ya que en esta se produce el aporte de energía hacia el fluido de trabajo, que posteriormente se transformará en vapor.

Estas calderas se pueden clasificar según la circulación del fluido de trabajo y de los gases de combustión, en los siguientes tipos: las pirotubulares y las acuotubulares.

- **Calderas pirotubulares**

Las calderas pirotubulares, son utilizadas cuando se quiere sacar provecho de mecanismos de recuperación de gases. Estas tienen una disposición horizontal, y en su interior cuentan con tuberías por las que circulan los gases de combustión, que serán los encargados de transmitir el calor hacia el agua que rodea estas tuberías como se observa en la Figura 2.

Cuentan con un espacio en la parte superior donde se recolecta el vapor generado, y chimeneas por las que saldrán expulsados los gases de combustión [5].

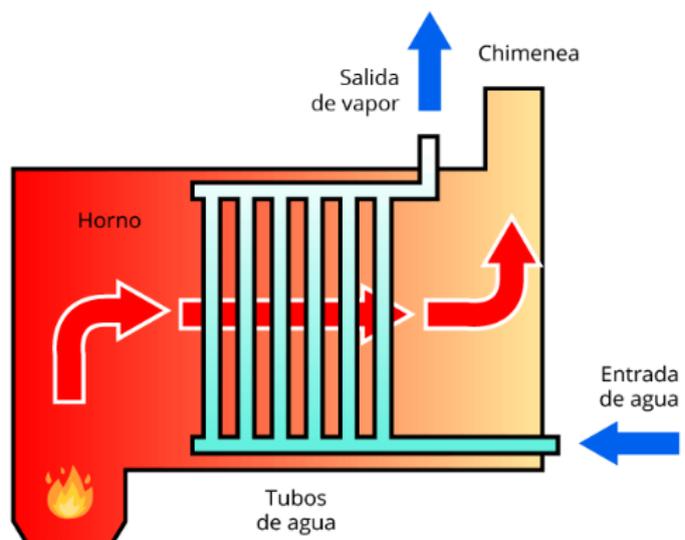


**Figura 2.** Caldera pirotubular

**Fuente:** [6]

- **Calderas acuotubulares**

En las calderas acuotubulares, el fluido de trabajo pasa por el interior de los tubos, y los gases de combustión por el exterior de estos. En la parte superior tiene una cámara de acumulación de vapor, y cuenta también con chimeneas para la salida de los gases de combustión. Por lo general estas calderas alcanzan valores más altos de presión y potencia que las pirotubulares [7]. En la Figura 3 se observa la estructura de una caldera acuotubular.



**Figura 3.** Caldera acuotubular

**Fuente:** [6]

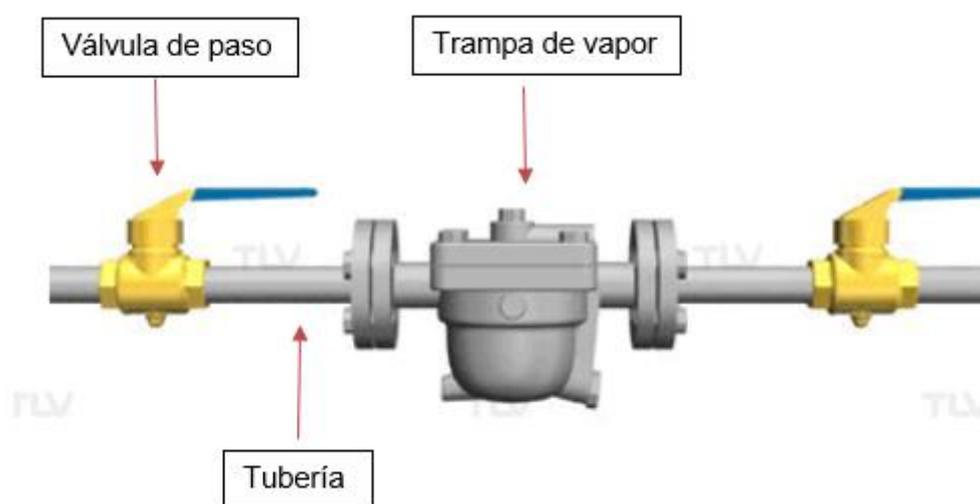
El resto de los componentes de este sistema, se seleccionarán y posicionarán, dependiendo de las características, funcionamiento y objetivo final de la caldera.

### **Distribución de vapor y retorno de condensado**

Este subsistema está compuesto por tuberías, trampas de vapor, válvulas y filtros. Es el encargado de transportar el vapor generado hacia los puntos de consumo, y de distribuirlo en función de la demanda que exista en cada equipo de consumo.

Un componente crucial en este sistema es la trampa de vapor, ya que es la responsable de separar los gases del condensado, para poder garantizar una transferencia de calor con la mayor eficiencia posible, y sin desperdiciar vapor con energía útil [8].

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de cómo pueden ir acoplados los elementos mencionados, en el subsistema de distribución de vapor.



**Figura 4.** Sección de un sistema de distribución

**Fuente:** (Adaptado de [9])

### **Uso de Vapor**

En el sector industrial, se utiliza vapor en los procesos que necesitan de una elevada presión de trabajo, una transferencia de grandes cantidades de calor, o una temperatura de proceso constante. Las aplicaciones de estos procesos pueden enfocarse, dependiendo del campo en el que se desarrollen, en la generación de energía eléctrica, esterilización de objetos, producción de alimentos, refinamiento de petróleo, etc. [10]

Dependerá de la industria específica en la que se esté trabajando, para determinar cuáles serán los componentes que componen el subsistema de aprovechamiento de vapor, y la configuración de estos.

### **1.4.3 Uso de vapor en una planta de alimentos**

Una planta de alimentos que funciona con sistemas de vapor está compuesta por los mismos sistemas mencionados anteriormente. Sin embargo, lo que distingue la industria de alimentos, de otras industrias que también funcionan con vapor, son los componentes que se utilizan para el aprovechamiento de este.

En una planta de alimentos los potenciales equipos que se utilizan generalmente para el aprovechamiento del vapor son:

- **Tanque de condensado**

Este componente sirve para mantener el agua que ingresa a la caldera a una temperatura constante; para lo cual, utiliza el vapor de agua generado, mismo que es suministrado mediante una válvula que responde a los cambios de temperatura para activarse [11].

- **Serpentín de calentamiento de Bunker**

El calentamiento de Bunker se realiza mediante el suministro de vapor a un serpentín de acero inoxidable, por el que pasa este combustible, con el fin de alcanzar la viscosidad adecuada, antes de que este ingrese al tanque diario [11].

- **Hornos**

La cocción de algunos alimentos se desarrolla dentro de hornos con distintas configuraciones, que dependen del producto a obtenerse. Sin embargo, el modo de funcionamiento de estos es similar, pues tienen un sistema de alimentación de aire exterior, que es calentado previo al ingreso del horno, mediante la interacción con el vapor en un intercambiador de calor, para que alcance una elevada temperatura, y así cumplir el proceso necesario [11].

- **Marmitas**

Las marmitas están rodeadas de un serpentín por el que circula vapor saturado, mismo que será el que caliente el agua que se encuentra dentro de la marmita, y esta será la que transfiera calor hacia los alimentos. Este sistema trabaja con válvulas que se activan en función de la temperatura interna de las marmitas, para dar paso al flujo de vapor [11].

- **Cámaras de mezcla**

En estas cámaras ingresa vapor saturado, y agua fría, con el fin de obtener agua caliente. Cabe recalcar, que el vapor saturado se consume, convirtiéndose en agua fría, y no existe retorno de condensado [11].

### **1.4.4 Funcionamiento de una planta en estado estable**

Un sistema en estado estable se entiende como un conjunto de componentes que desarrollan un proceso, en el que las entradas tienen un comportamiento constante o periódico a lo largo del tiempo; y, por lo tanto, los productos de este proceso también tendrán un comportamiento constante a lo largo del tiempo. Es por eso que, para referirse a un sistema en estado estable, también se puede decir que el sistema está en equilibrio [12].

En un sistema de vapor, las entradas pueden considerarse los flujos de agua, combustible y aire;

y la salida será el flujo de vapor. De manera que, para que una planta se considere que trabaja en estado estable, los flujos de combustible, agua y aire deberán ser constantes dentro de un tiempo de análisis determinado, así como el flujo de vapor que sea generado.

### **1.4.5 Modelado y simulación de sistemas**

El desarrollo actual de las industrias, y el crecimiento constante que existe en ellas, hace necesaria la innovación en los procesos tradicionales, para cumplir con sus objetivos; es por eso que, estos están sometidos a constantes modificaciones para tratar de optimizarlos y así obtener mayores beneficios en los resultados.

La modelación y simulación de procesos han sido herramientas clave para la innovación y optimización de procesos, y lo seguirán siendo con el paso del tiempo. Esto se debe a la velocidad de respuesta que se tiene al utilizarlas, la precisión de los resultados generados, y los bajos costo de producción que se necesitan.

La modelación permite recrear de manera virtual los sistemas que intervienen en los procesos industriales, mientras que la simulación permite reproducir el comportamiento de estos, en tiempos muy cortos. Es por eso, que cuando se trata de buscar alternativas a las configuraciones tradicionales de sistemas, en pro de su optimización, el modelado y simulación son de las opciones más acertadas para lograrlo; y una herramienta muy completa que permite realizar estas actividades es el programa Wolfram System Modeler.

### **1.4.6 Wolfram System Modeler**

Wolfram System Modeler es un software creado para el modelado físico y simulación de sistemas, muy completo, potente e intuitivo, con una amigable interfaz gráfica. El alcance de esta herramienta es muy extenso, pues se puede utilizar las herramientas de cálculo integradas en las bibliotecas, o incluso se puede añadir ecuaciones propias, mediante la programación con Wolfram Language, y también es compatible con el lenguaje de Modelica [13].

Una de las características distintivas de este software es que se puede crear modelos multidominio; es decir, se puede modelar sistemas eléctricos, mecánicos, termodinámicos, químicos, etc., integrados e interrelacionados en un solo sistema, para poder trabajar con sistemas del mundo real [13].

Por otra parte, una limitación que presenta para el desarrollo de este proyecto, es que no es un programa que utilice Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para la resolución de ecuaciones de conservación de masa, energía y momento. Sin embargo, tiene la capacidad de modelar sistemas que involucren la mecánica de fluidos dentro de un enfoque más amplio de sistemas ciberfísicos.

#### **Ventajas frente a otros softwares**

Wolfram System Modeler tiene varias ventajas frente a otros programas de simulación avanzados, en cuanto herramientas, manejabilidad, accesibilidad, interfaz gráfica y alcance.

Una comparación entre Wolfram System Modeler, MapleSim, y Simulink; siendo los dos últimos, dos programas muy utilizados para modelamiento y simulación de sistemas, se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Comparación entre Wolfram System Modeler, MapleSim y Simulink

Disponible sin costo adicional 	Parcialmente disponible  	No disponible 	Disponible con costo adicional 
PROGRAMA	Wolfram System Modeler (Versión 13.3)	MapleSim (2023.1)	Simulink (Versión R2023a)
<b>REQUERIMIENTOS</b>			
Requerimientos suplementarios	Mathematica (opcional)	Maple (obligatorio)	MATLAB (obligatorio)
<b>MODELADO</b>			
Modelado Multidominio			
Modelado jerárquico que sigue topología de la vida real			
Documentación automática de modelos			
Soporte para Modélica		 	
Creación de componentes basados en ecuaciones simbólicas			
Editor de Modelica completo y funcional		 	
Depuración avanzada de ecuaciones de modelos		 	 
<b>SIMULACIÓN</b>			
Solver en tiempo real			 

REPRESENTACIÓN GRÁFICA			
Representación gráfica de todas las variables			
Guarda representaciones gráficas totalmente configuradas en el modelo			
Tiene representaciones gráficas en tiempo real de forma interactiva			
Diagramas animados			

Fuente: (Adaptado de: [14])

### Herramientas para modelado de sistemas de vapor

Wolfram System Modeler tiene varias librerías con componentes listos para ser arrastrados al área de trabajo, conectarlos y simular su comportamiento.

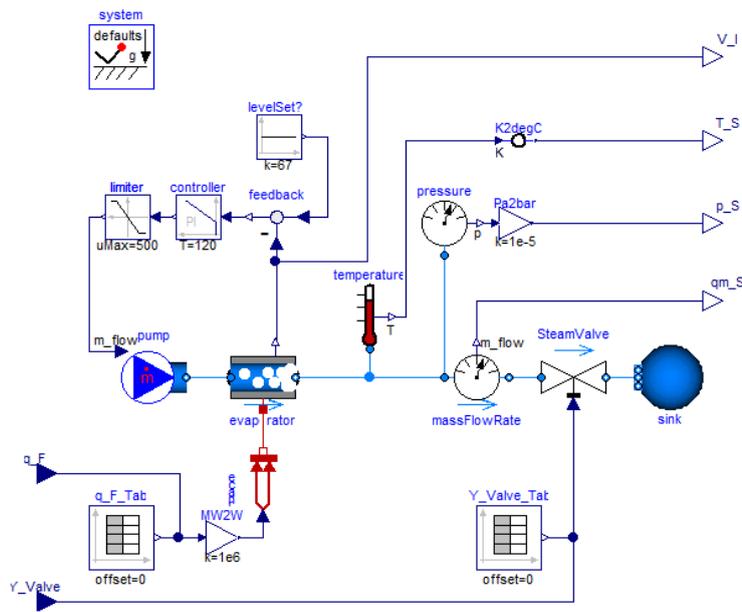
A pesar de no ser un programa que utilice CFD, dentro de las librerías que tiene, existen dos que son útiles para poder modelar sistemas que involucren dinámica de fluidos, y que por ende servirán para poder generar una representación virtual de un sistema de producción de vapor; estas son: "Thermal" y "Fluid".

- **Fluid**

El paquete "Fluid" viene incluido por defecto dentro de las librerías de Modelica, y dispone de elementos enfocados en el modelamiento del flujo de termofluidos de una sola dimensión, a través de tuberías, recipientes, máquinas que trabajen con fluidos, válvulas, y demás accesorios [15].

Una de las características más destacables de esta librería, es que los componentes pueden trabajar con diferentes fluidos que pertenezcan a la librería "Media", debido a que las correlaciones y ecuaciones sobre pérdidas de presión o transferencia de calor, funcionan de manera independiente. Esto garantiza, que, durante el modelamiento, se podrá utilizar fluidos compresibles o incompresibles, compuestos de una o varias sustancias, o incluso con varias fases [15].

Los componentes que forman un sistema de vapor, y que pueden encontrarse en esta librería son: bombas, tuberías, válvulas, fuentes, accesorios, y sensores. Incluso existen modelos predeterminados de sistemas, formados por varios componentes de Modelica, que pueden utilizarse para ser agregados de forma integrada a un proyecto o sistema más grande que lo requiera; por ejemplo: "Drum Boiler", que es el sistema de funcionamiento de una caldera, el cual está configurado como se observa en la Figura 5 [15].



**Figura 5.** Modelo de una caldera, existente dentro de la librería “Fluid”

**Fuente:** [15]

Cabe destacar que cada uno de los componentes de las librerías, pueden ser configurados con los datos de entrada que se necesite en cada caso.

El paquete “Fluid” cuenta además con herramientas para calcular las pérdidas de presión del fluido, y la transferencia de calor que este experimenta [15].

- **Thermal**

Esta librería está enfocada en la transferencia de energía entre los distintos componentes de un sistema. Aquí se pueden encontrar modelos de transferencia de calor conductivos, convectivos y radiativos, donde se podrán controlar los valores de las resistencias a la transferencia de calor, las fuentes de calor, así como los coeficientes de transferencia.

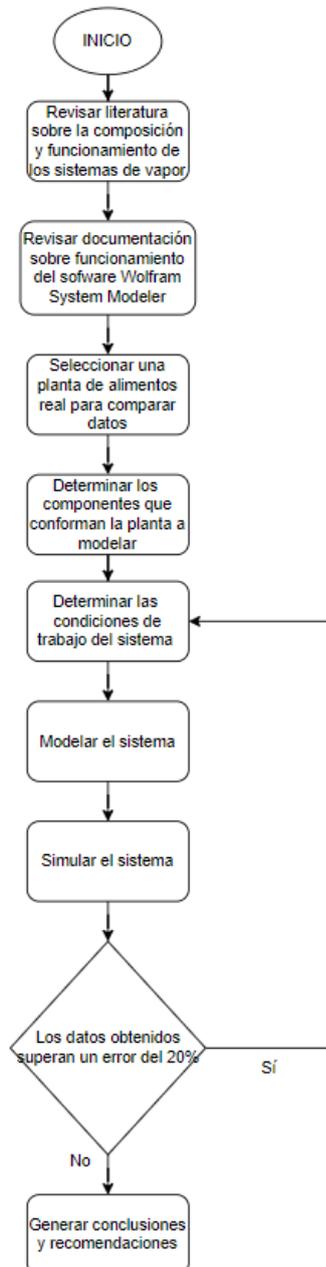
Esta librería cuenta además con una base de datos de materiales y elementos con sus respectivas propiedades termodinámicas, que facilita el proceso de modelado, al evitar el proceso de caracterización manual de los componentes. Sin embargo, también se puede agregar nuevos materiales que no se encuentren en la base de datos, con sus respectivas propiedades. [16]

Además de estas librerías, existe una muy importante, que es imprescindible para el funcionamiento de las otras dos mencionadas. ‘Blocks’ es una librería que contiene señales de ingreso, para activar algunos componentes que necesitan necesariamente de señales para funcionar, ya sean estas continuas, discretas, constantes, o incluso mediante tablas de valores.

## 2 METODOLOGÍA

En esta sección se detallará el proceso que se siguió durante este trabajo, para cumplir con los objetivos planteados.

Este procedimiento se representa de manera resumida en el siguiente diagrama de flujo, evidenciado en la Figura 6.



**Figura 6.** Metodología por seguir

**Fuente:** Propia

## **2.1 Revisión bibliográfica**

La revisión bibliográfica para el desarrollo de este trabajo estuvo enfocada en hallar información sobre la composición y funcionamiento de los sistemas de vapor, que se han descrito ya en la sección 1. Pero adicionalmente, se revisó también documentación para comprender el uso de Wolfram System Modeler.

Para entender el funcionamiento del software, principalmente se revisaron videos tutoriales (propiedad de Wolfram), donde se explica el uso del programa, y se dan algunas guías para saber cómo modelar y simular de manera general algunos sistemas básicos. Estos videos, se encuentran en los cursos de capacitación, cargados en la sección de 'Recursos', en la página de Wolfram System Modeler.

Además, las librerías del programa cuentan también con un centro de ayuda, donde se puede encontrar información relevante sobre cada componente, como su naturaleza, la librería a la que pertenece, los elementos que lo componen, los inputs, outputs, etc. Incluso, este centro de ayuda muestra algunos ejemplos de sistemas completos, en los que se utiliza el componente en cuestión, ayudando así al entendimiento de la configuración de los modelos.

Principalmente con estas dos fuentes de información, se logró entender el funcionamiento del programa, y la forma de interconectar los elementos, y configurarlos, para poder modelar el sistema de vapor requerido para el desarrollo de este trabajo.

## **2.2 Determinación de los componentes y condiciones del sistema**

Para garantizar un comportamiento del sistema, que sea similar a uno real, se tomará como referencia la información sobre las condiciones de trabajo reales a las que está sometido el sistema de vapor, utilizado para la cocción de alimentos de la planta de elaborados y embutidos de Pronaca [11]

### **2.2.1 Componentes que conforman el sistema de vapor**

En esta sección se determinarán los componentes que formarán parte de cada una de las secciones que conforman el sistema de vapor: generación de vapor, distribución de vapor, consumo de vapor.

#### **Generador de vapor**

Para la generación de vapor, es necesario utilizar una fuente de alimentación de agua hacia la caldera, que pueda ser controlada para que el flujo que ingresa esté en función del volumen de agua dentro de la caldera, ya que es necesario que este sea constante a lo largo de todo el proceso.

Se necesita también una caldera, donde el agua ganará energía que será suministrada mediante una fuente de calor, hasta convertirse en vapor, que posteriormente será transportado hacia los equipos de consumo.

#### **Distribuidor de vapor**

Para la distribución de vapor, es necesario un conjunto de tuberías que transporten el vapor hacia el punto de consumo, y válvulas que controlen el paso de vapor a través de las tuberías.

### **Equipos de consumo de vapor**

Para este caso, se necesitará dos equipos de consumo, que serán un horno y una marmita, en los cuales ingresará una cantidad de comida, que deberá ser cocinada mediante el aprovechamiento de la energía del vapor que llega hacia estos equipos.

## **2.2.2 Condiciones de trabajo de los componentes**

A continuación, se detallan las características y condiciones de trabajo de los componentes que forman parte del sistema de vapor a modelar.

### **Condiciones de trabajo en la caldera**

Para el proceso de generación de vapor, se considerará una caldera acuotubular que trabajará bajo las condiciones indicadas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones de trabajo de la caldera

<b>Capacidad [<math>m^3</math>]</b>	9.28
<b>Temperatura de trabajo [<math>^{\circ}C</math>]</b>	168.5
<b>Presión de trabajo [kPa]</b>	764.28
<b>Entalpía de vapor [kJ/kg]</b>	712.69

Fuente: [11]

El volumen inicial de agua en la caldera, mismo que se mantendrá constante mediante un sistema de inyección de agua controlado, a lo largo de todo el proceso, es de  $6.5 m^3$ , pues la recomendación para la operación de estas calderas es que el nivel de agua sea el 70% del volumen total del tambor [17].

El quemador que será la fuente de calor para este componente será controlado en función de la temperatura de los alimentos que se encuentren en los equipos de consumo.

### **Condiciones de trabajo para la marmita**

Como uno de los equipos de consumo de vapor, se considerará una marmita que trabajará con las condiciones detalladas en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Condiciones de trabajo para la marmita

<b>Capacidad [<math>m^3</math>]</b>	1.5
<b>Nivel de agua [<math>m^3</math>]</b>	1.5
<b>Temperatura inicial del agua [<math>^{\circ}C</math>]</b>	16
<b>Presión inicial [bar]</b>	1
<b>Temperatura inicial de la comida [<math>^{\circ}C</math>]</b>	11.8
<b>Temperatura final de la comida [<math>^{\circ}C</math>]</b>	74

Fuente: [11]

La marmita se asumirá como un elemento ideal y completamente aislado, en el que la fuente de calor será un serpentín que estará ubicado en la base de la recámara.

**Condiciones de trabajo para el horno.**

Como un segundo equipo de consumo de vapor, se considerará un horno que trabajará con las condiciones detalladas en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Condiciones de trabajo para el horno

<b>Capacidad [m<sup>3</sup>]</b>	11.36
<b>Temperatura inicial del aire [°C]</b>	20
<b>Presión inicial [bar]</b>	1
<b>Temperatura de ingreso de la comida [°C]</b>	11.8
<b>Temperatura de salida de la comida [°C]</b>	74

Fuente: [11]

Del mismo modo, el horno se considerará como un elemento ideal y completamente aislado, en el que la fuente de calor estará ubicada en la parte superior de la recámara.

**Condiciones de trabajo para la válvula**

La válvula que controlará el paso de vapor desde la caldera hacia los equipos de consumo será ideal y adiabática. Esta se abrirá y cerrará en función de la demanda de vapor en los equipos de consumo, para mantener controlada la temperatura dentro de los mismos.

**2.4 Modelación del Sistema**

En esta sección se indicarán los elementos dentro de las librerías de Wolfram System Modeler, que representarán los componentes descritos en la sección 2.3, y se detallará la forma en la que estos se configurarán dentro de la ventana de trabajo del programa, hasta tener una representación virtual del sistema de vapor.

**2.4.1 Elementos del software a ser utilizados**

Para el modelado del sistema, se utilizaron las librerías descritas en la sección 1.

El detalle de los elementos utilizados, el subsistema al que pertenecen, y las librerías en las que se encuentran, se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Elementos del software, utilizados para modelar el sistema de vapor

<b>Elemento por representar</b>	<b>Subsistema</b>	<b>Librería</b>	<b>Representación dentro del software</b>
Bomba de suministro de agua	Generación de vapor	Fluid	 MassFlowSource_h

Caldera	Generación de vapor	Fluid	 EquilibriumDrumBoiler
Quemador	Generación de vapor	Thermal	 PrescribedHeatFlow  TimeTable  Gain
Sistema de control de ingreso de agua a la caldera	Generación de vapor	Blocks	 Feedback  Constant  PI  Limiter
Válvula de paso	Distribución de vapor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluid</li> <li>• Blocks</li> </ul>	 ValveLinear  TimeTable
Horno y Marmita	Consumo de vapor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluid</li> <li>• Blocks</li> <li>• Thermal</li> </ul>	 ClosedVolume  DynamicPipe  Convection  PrescribedTemperature  TimeTable

Fuente: Propia

### 2.4.2 Configuración de los componentes para la simulación

Los componentes utilizados para el modelamiento de la planta necesitan leer ciertos inputs, para conocer las condiciones de trabajo bajo las cuales deseamos realizar la simulación.

En esta sección se explicará los valores que introducimos como inputs en cada elemento del sistema, que están detallados en la tabla 2.

### **2.4.2.1 Bomba de alimentación de agua**

Dentro del software, el nombre del elemento que se utilizó para simular el comportamiento de una bomba de alimentación de agua a la caldera es "Massflowsource\_h". Para configurar este elemento, los parámetros que se ingresó como inputs fueron los siguientes:

- Medio: "Water using IF97 standard, explicit in p and h".

Este medio es agua que utiliza la norma IF97, y se lo seleccionó porque en la lista de medios que se pueden elegir, existe una recomendación del software que dice que se use esta clase de agua para la mayoría de las aplicaciones [16].

- Número de puertos: 1

Este valor indica que solo se estará recibiendo información en un puerto del componente.

- Flujo másico de agua: Señal de ingreso

Para indicar el flujo másico de agua que ingresa a la caldera, se conecta en el puerto de entrada una señal que será variable, que represente ese valor. Esta señal está controlada por un sistema PI, y trabaja en función del nivel de agua que se debe mantener en la caldera.

El sistema de control está compuesto por los elementos cuyos nombres en el programa son "Feedback", "Constant", "PI" y "Limiter".

El elemento "Feedback" tiene dos inputs y un output. La función de este elemento es leer la señal de salida de la caldera que indica el volumen instantáneo de agua en la caldera, y compararla con un valor fijo que se le ha asignado mediante el elemento "Constant", que es una señal constante. Finalmente, arroja una señal de salida que representa el error entre las dos señales de ingreso.

La señal que ha salido del "Feedback" deberá ser conectada como input hacia el controlador "PI" que será el encargado de manejar la señal para evitar que el sistema fluctúe y poder llevar al sistema a su punto de ajuste [18]

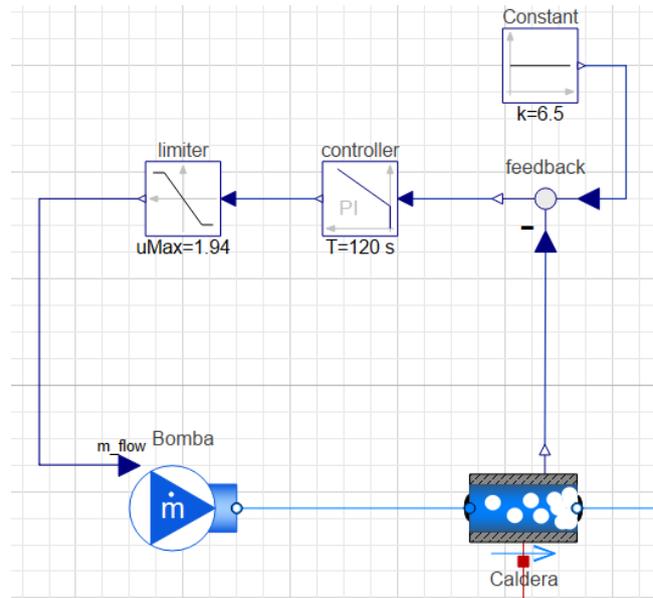
Finalmente, la señal que sale del "PI" será ingresada como input al "Limiter" que será el encargado de mantener el valor del caudal dentro de un límite máximo, pues la señal que llega desde el "PI" será igual a la señal de salida del "Limiter", solo si no se excede un valor máximo asignado como el límite [16], para evitar que valores muy exorbitantes de caudales de agua ingresen a la caldera, provocando alteraciones.

En este caso, el valor de referencia que se le dará al "Feedback" es de 6.5, pues lo que se quiere es que el volumen del agua dentro de la caldera se mantenga en  $6.5m^3$  como se explicó en la sección 2.3.

Para el caso del "Límiter", el valor máximo que deberá admitir es de 1.94, pues según el catálogo de bombas "Aurora", este es el valor del caudal de agua de suministro a la caldera [11].

El esquema de cómo están interconectados estos elementos que conforman el sistema de

control del flujo de agua que ingresa a la caldera se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Sistema de control del flujo de agua que entra a la caldera.

**Fuente:** Propia

- Entalpía: 68030 J/kg

El valor de la entalpía del agua de alimentación se obtuvo al considerar que el agua entra a 16°C y 130 psig [11].

Para el resto de los parámetros a configurar en la bomba, se dejó los valores por defecto del programa, ya que no se cuenta con toda la información necesaria.

### 2.4.2.2 Caldera

Del mismo modo, dentro del software, el nombre del elemento que se utilizó para simular el comportamiento de la caldera es “EquilibriumDrumBoiler”. Los parámetros ingresados como inputs para este caso se detallan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Configuración de parámetros en la caldera

Parámetro	Valor
Medio	“Water using IF97 standard, explicit in p and h”
Volumen del tambor [ $m^3$ ]	9.28
Entalpía específica de vapor [J/kg]	712690
Entalpía específica de líquido [J/kg]	68030
Densidad en la fase de vapor [ $g/cm^3$ ]	0.899
Densidad en la fase de líquido [ $g/cm^3$ ]	0.9993
Presión de inicio [bar]	1
Volumen inicial de agua [ $m^3$ ]	6.5

**Fuente:** Propia

## Consideraciones

- Para determinar el volumen de la caldera de este modelo, se ha tomado como referencia el volumen de la caldera real que se utiliza en la planta de producción de Pronaca.
- El valor de la entalpía es el correspondiente al punto de trabajo de la caldera.
- El valor de la entalpía del líquido es el mismo valor de entalpía del agua de alimentación en la bomba.
- El valor de la densidad corresponde a la densidad del vapor de agua, en las condiciones de generación de vapor.
- El valor de la densidad corresponde a la densidad del agua, en las condiciones de ingreso de agua hacia la caldera.
- Se considera que la caldera está trabajando a una presión atmosférica a nivel del mar.
- El valor del volumen inicial del agua se establece según las condiciones de trabajo de la caldera.

Adicionalmente, a esta caldera es necesario agregarle una fuente de calor, que en este caso será una señal variable controlada.

La fuente de calor, que dentro del programa tiene el nombre de "PrescribedHeatFlow", y que en nuestro caso representa al quemador, se ingresará como input hacia la caldera, pero en forma de una señal variable, pues dependiendo del requerimiento energético, el quemador se encenderá o apagará en determinados lapsos de tiempo.

Para el caso de la marmita, el quemador se encenderá en el instante cero, hasta que la temperatura del agua de la marmita sea de 87°C como producto del intercambio de calor entre el fuego y el agua. Luego este se apagará, se introducirá la comida en la marmita, y se dejará que se enfríe hasta los 83°C como producto del intercambio de calor entre el agua y la comida. Así el comportamiento del quemador se repetirá el número de ciclos necesarios dentro de este rango de temperaturas, hasta que se complete la cocción de la comida, es decir hasta que esta alcance una temperatura de 74°C. [11].

Para el caso del horno, el comportamiento del quemador será el mismo, pero en un rango de temperaturas de entre 86°C y 80°C, con aire como fluido de trabajo.

Bajo esta lógica, los tiempos en los que se deberán enviar las señales del quemador hacia la caldera, serán los tiempos que les tome a los fluidos de trabajo calentarse y enfriarse dentro de los rangos establecidos.

Para determinar estos intervalos de tiempo, se recurrirá al uso de un software auxiliar que nos permita visualizar la variación del comportamiento de los fluidos al ser sometidos a los distintos intercambios de calor, a lo largo del tiempo. El nombre del software auxiliar es COMSOL Multiphysics.

La forma en la que se realizó el modelado y simulación de los procesos de cocción en el horno

y la marmita, en COMSOL, y los resultados obtenidos en cuanto a los tiempos de los procesos se detalla en el Anexo 1.

Al organizar los tiempos obtenidos, se puede generar una tabla de datos que representará una señal rectangular, misma que será la responsable de emitir señales al quemador sobre el encendido y apagado, en los intervalos establecidos. Esta tabla se encuentra dentro del programa con el nombre de "TimeTable", y será similar a la Tabla 7.

**Tabla 7.** Señales de encendido y apagado del quemador con la marmita como consumidor de vapor.

Tiempo de simulación [s]	Energía emitida por el quemador [MW]
0	2
7815	2
7816	0
10089	0
10090	2
11970	2
11971	0
14282	0
14283	2
16332	2

Fuente: Propia

Cabe recalcar que, al ser consumidores de vapor con comportamientos diferentes, los datos de tiempo obtenidos serán diferentes para el horno y la marmita. Por lo tanto, los intervalos de encendido y apagado, cuando el consumidor de vapor es el horno, serán diferentes, como se puede observar en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Señales de encendido y apagado del quemador con el horno como consumidor de vapor

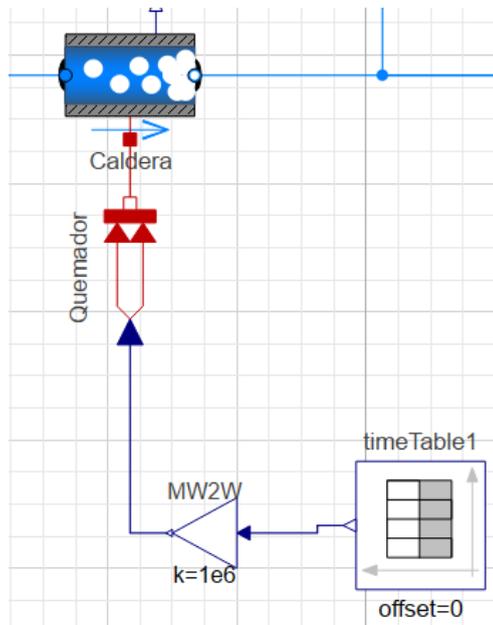
Tiempo de simulación [s]	Energía emitida por el quemador [MW]
0	2
3034	2
3035	0
3403	0
3404	2
4588	2
4589	0
5955	0
5956	2

6988	2
6989	0
10527	0
10528	2
11392	2
11393	0
13920	0

**Fuente:** Propia

Antes de que la señal emitida por la tabla de datos llegue al quemador, pasa por un elemento multiplicador de señal llamado "Gain", con la única intención de convertir el valor de Energía de MW a W, debido a que la caldera lee este input en W.

El esquema de cómo están interconectados estos elementos que son indispensables para el funcionamiento de la fuente de calor de la caldera, se muestra en la Figura 8.



**Figura 8.** Modelado de la fuente de calor de la caldera.

**Fuente:** Propia

### 2.4.2.3 Válvula de paso

El funcionamiento de la válvula de paso es exactamente igual que el del quemador, pues también depende del requerimiento energético de los equipos de consumo. De manera que, cuando se requiera energía en el horno o marmita, el quemador se encenderá y la válvula se abrirá, mientras que, si se necesita cortar el suministro de energía, el quemador se apagará y la válvula se cerrará. Por lo tanto, los mismos tiempos de operación del quemador, serán los de la válvula. Para generar la tabla de datos en este caso, la única diferencia que hay que considerar es que la válvula lee como inputs valores de 1 y 0, para representar el estado de totalmente abierto y cerrado, respectivamente.

La representación de cómo se deberán introducir los datos en la “TimeTable” para este elemento, cuando el consumidor de vapor es la marmita se evidencian en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Señales de abierto y cerrado de la válvula con la marmita como consumidor de vapor

Tiempo de simulación [s]	Apertura de la válvula
0	1
7815	1
7816	0
10089	0
10090	1
11970	1
11971	0
14282	0
14283	1
16332	1

**Fuente:** Propia

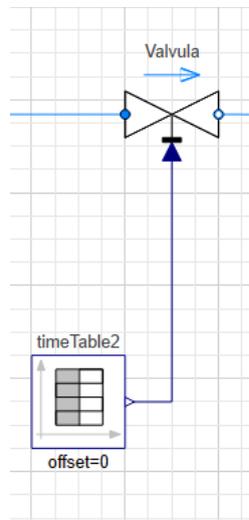
Para el caso del horno, los valores que serán configurados para la apertura de la válvula se pueden observar en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Señales de abierto y cerrado de la válvula con el horno como consumidor de vapor

Tiempo de simulación [s]	Apertura de la válvula
0	1
3034	1
3035	0
3403	0
3404	1
4588	1
4589	0
5955	0
5956	1
6988	1
6989	0
10527	0
10528	1
11392	1
11393	0
13920	0

**Fuente:** Propia

La forma en que se conectan los elementos para el funcionamiento de la válvula se puede observar en la Figura 9.



**Figura 9.** Modelado de la válvula

**Fuente:** Propia

Además de estos valores, se definirá el mismo medio de trabajo que en los demás componentes, y los demás parámetros solicitados los dejamos en los valores predeterminados, al no tener información adicional.

#### 2.4.2.4 Marmita

Los parámetros para el funcionamiento de este sistema se deberán introducir en dos componentes diferentes que son los que lo componen: El serpentín y la cámara de la marmita.

##### Serpentín

El serpentín será el encargado de calentar el agua, al permitir el flujo de vapor por su interior, que será el que intercambie calor con el agua. Este elemento dentro del software tiene el nombre de “DynamicPipe” y los parámetros que se introducen como inputs se evidencian en la tabla Tabla 11.

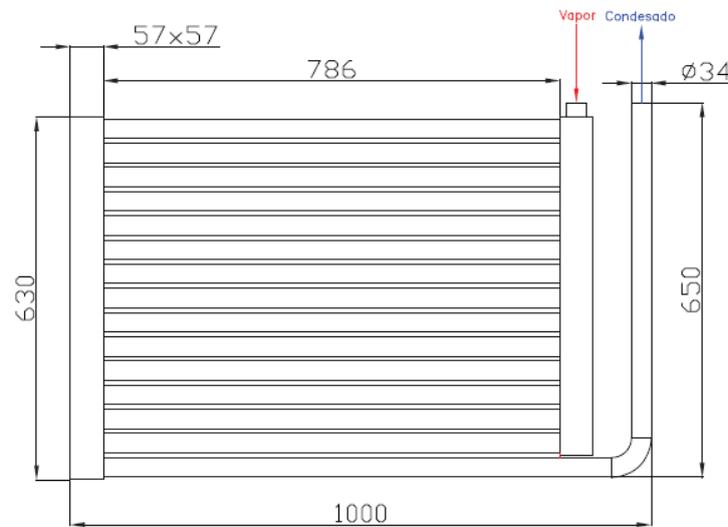
**Tabla 11.** Configuración de parámetros para el serpentín

Parámetro	Valor
Medio	“Water using IF97 standard, explicit in p and h”.
Longitud [m]	12.4
Diámetro [m]	0.034
Uso de transferencia de calor	true
Coefficiente de transferencia de calor (alpha)	1030

**Fuente:** Propia

La longitud del serpentín se obtuvo usando como referencia las dimensiones reales del serpentín de una marmita utilizada en la planta de producción de Pronaca.

El diagrama con las dimensiones del serpentín de las marmitas de esta planta se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Dimensiones en milímetros del serpentín de la marmita

**Fuente:** [11]

Entonces al multiplicar el número de pasos del tubo, por la longitud de cada paso, y sumarle el tramo final de salida, se obtiene que la longitud del serpentín es:

$$L = 786 \times 15 + 650 = 12.4 \text{ m}$$

Por otra parte, para permitir la transferencia de calor entre el serpentín y otro componente, se debe activar el puerto de transferencia de calor del elemento, mediante la selección de la opción “true” en el input “use\_HeatTransfer”

En cuanto al coeficiente de transferencia de calor, se determinó de manera experimental e iterativa, pues con los tiempos de calentamiento y enfriamiento obtenidos del software COMSOL Multiphysics, ya se tiene una idea del comportamiento del fenómeno de transferencia de calor. Por lo tanto, para lograr que se alcancen las temperaturas requeridas en el tiempo establecido, se fue modificando este coeficiente de transferencia de calor, hasta obtener la curva de variación de temperatura en función del tiempo deseada.

Al serpentín debe ir conectado un elemento al que llegue todo el fluido después de haber transferido calor con la marmita, y este será representado como un sumidero, que dentro del software tiene el nombre de Boundary\_Pt. En este elemento no hace falta configurar ningún parámetro; solo se lo debe conectar al serpentín.

El resto de los parámetros se los dejó con los valores por defecto del programa.

### **Cámara de la marmita**

La cámara de la marmita será simulada como un tanque cerrado, que dentro del programa tiene el nombre de “ClosedVolume”, y trabajará bajo las condiciones explicadas en la sección 2.3.

Los parámetros configurados para este componente como inputs se detallan en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Configuración de parámetros para la cámara de la marmita

Parámetro	Valor
Medio	“Water using IF97 standard, explicit in p and h”
Volumen [ $m^3$ ]	1.5
Número de puertos	1
Presión inicial [bar]	1
Temperatura inicial [°C]	16
Uso de transferencia de calor	true

**Fuente:** Propia

El valor del número de puertos indica que solo se estará recibiendo información en un puerto del componente.

Al igual que en el serpentín, para este componente también se debe activar la opción de transferencia de calor, para que este elemento pueda recibir una entrada de calor, mediante la selección de la opción “true” en el parámetro “Uso de transferencia de calor”.

El intercambio de calor que se realizará en este componente será de ganancia de calor desde el serpentín, y de pérdida de calor hacia la comida.

Para modelar un sistema que represente la transferencia de calor entre el agua de la marmita y la comida, se conecta en el puerto de transferencia de calor de la cámara de la marmita, un componente que genera transferencia de calor por convección (llamado “Convection”), y a este se le conectará otro componente que simula un cuerpo con una temperatura prescrita (llamado “PrescribedTemperature”) para representar la comida.

El input que necesita el modelo de transferencia de calor es una señal con el coeficiente de convección “h” que interviene en el proceso. Para este caso, serán diferentes valores de h los que se ingresarán, para cada etapa de la cocción, mismos que han sido determinados de manera experimental e iterativa, siguiendo la misma lógica explicada para la obtención de “alpha” en el serpentín.

Estos valores se los ingresará con la ayuda de un “TimeTable”, y estarán configurados como se muestra en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Valores de h para cada etapa del proceso de cocción con la marmita como consumidor de vapor.

Tiempo de simulación [s]	h [W/K]
0	0
7815	0
7816	500
10089	500

10090	700
11970	700
11971	1000
14282	1000
14283	2350
16332	2350

**Fuente:** Propia

En este caso el valor de 0 que interviene en la etapa inicial es porque en el primer proceso de calentamiento aún no se ha ingresado la comida a la marmita, por lo tanto, no existe transferencia de calor.

Por otra parte, el input que necesita el componente que representa la comida, es una temperatura prescrita, que representará la temperatura de la comida en cada etapa de la cocción. Por lo tanto, estos valores también serán variables, y se los ingresará con un "TimeTable".

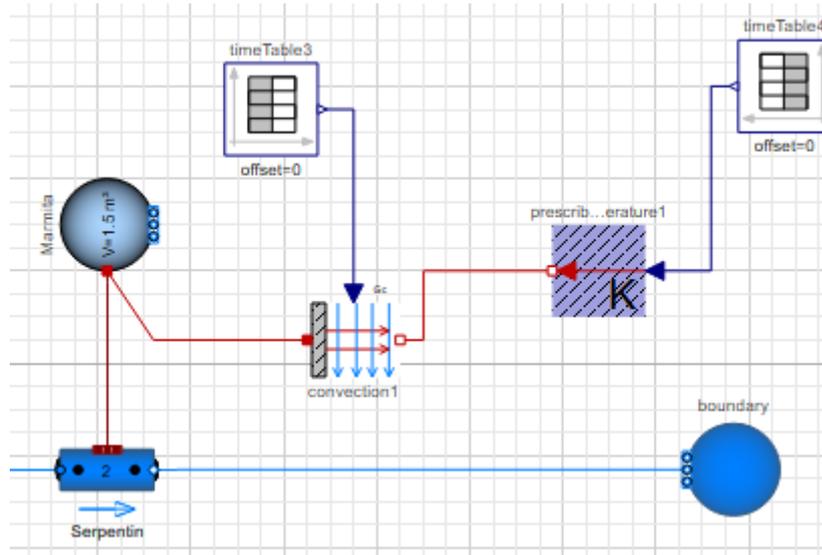
Los valores de temperatura configurados se han obtenido también con la ayuda del programa COMSOL Multiphysics, y se los puede evidenciar en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Temperatura de la comida en cada etapa del proceso de cocción con la marmita como consumidor de vapor

Tiempo de simulación [s]	T [K]
0	284.95
7815	284.95
7816	284.95
10089	303.21
10090	303.21
11970	315.92
11971	315.92
14282	338.92
14283	338.92
16332	346.88

**Fuente:** Propia

La forma en la que los componentes mencionados se interconectan para modelar la marmita se puede observar en la Figura 11.



**Figura 11.** Modelado de la marmita

**Fuente:** Propia

### 2.4.2.5 Horno

El modelamiento del horno es muy similar al de la marmita, pues se utilizan los mismos componentes. Sin embargo, algunos valores de entrada sí cambian en cada componente.

Para este caso, el elemento que suministra calor a la cámara del horno, ya no lo denominaremos un serpentín, sino una tubería de inyección de calor hacia el horno, pero el elemento del software utilizado seguirá siendo “DynamicPipe”.

A continuación, se detallan los parámetros configurados para este sistema:

#### **Tubería de inyección de calor hacia el horno**

Los valores de los parámetros para configurar la tubería de inyección de calor hacia el horno se detallan en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Configuración de parámetros para la tubería de inyección de calor hacia el horno

Parámetro	Valor
Medio	“Water using IF97 standard, explicit in p and h”
Coefficiente de transferencia de calor (Alpha)	23
Longitud [m]	5
Diámetro [m]	0.0508
Uso de transferencia de calor	true

**Fuente:** Propia

El valor de Alpha fue obtenido mediante la misma lógica, siguiendo un proceso experimental iterativo.

La longitud y el diámetro son asunciones que se hacen debido a la falta de información.

#### **Cámara del horno**

En este caso se utilizará también el “ClosedVolume”, al igual que en la cámara de la marmita, y

los valores de los parámetros se detallan en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Configuración de parámetros para la cámara del horno

Parámetro	Valor
Medio	"Air: Moist air model"
Volumen [ $m^3$ ]	11.36
Número de puertos	1
Presión inicial [bar]	1
Temperatura inicial [°C]	20
Uso de transferencia de calor	true

**Fuente:** Propia

El medio de trabajo ahora será "Air: Moist air model", pues el horno deberá trabajar con aire.

La justificación de los demás valores sigue la misma lógica explicada para el funcionamiento de la marmita.

Los valores de h configurados en el modelo de transferencia convectivo para este caso se obtuvieron siguiendo el mismo proceso que en la marmita, y se los detalla en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Valores de h para cada etapa del proceso de cocción con el horno como consumidor de vapor.

Tiempo de simulación [s]	h [W/K]
0	0
3034	0
3035	5
3403	5
3404	1.75
4588	1.75
4589	4.4
5955	4.4
5956	2.1
6988	2.1
6989	7
10527	7
10528	4.3
11392	4.3
11393	20
13920	20

**Fuente:** Propia

De igual manera los valores de la temperatura prescrita en el componente que modela la comida

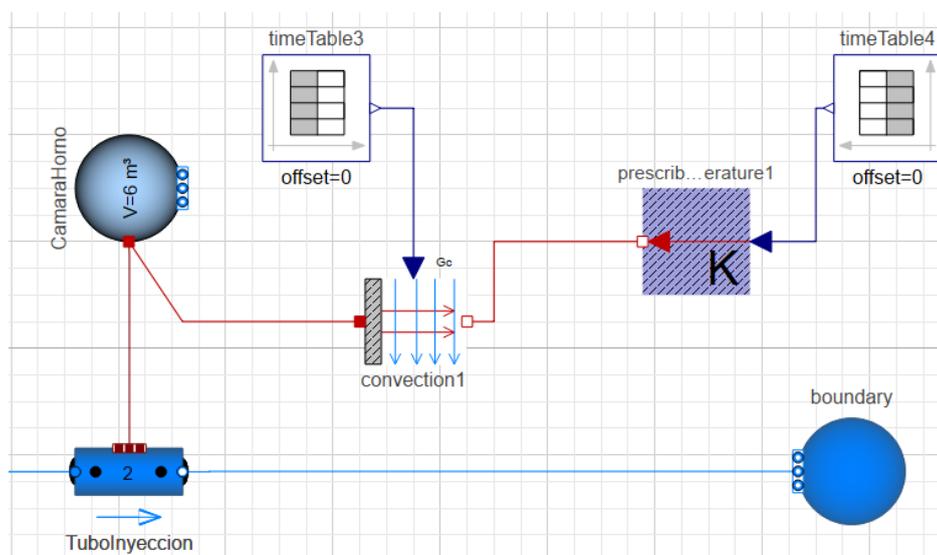
se obtuvieron con ayuda del COMSOL Multiphysics, y se detallan en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Temperatura de la comida en cada etapa del proceso de cocción con el horno como consumidor de vapor

Tiempo de simulación [s]	T [K]
0	284.95
3034	284.95
3035	284.95
3403	293.47
3404	293.47
4588	302.84
4589	302.84
5955	310.9
5956	310.9
6988	319.67
6989	319.67
10527	330.39
10528	330.39
11392	339.94
11393	339.94
13920	347.43

Fuente: Propia

La forma en la que los componentes mencionados se interconectan para modelar el horno se puede observar en la Figura 12.



**Figura 12.** Modelado del horno

Fuente: Propia

## 2.5 Simulación del Sistema

Para realizar la simulación del sistema, se debe tener en cuenta ciertas consideraciones con respecto a la etapa del modelado.

- Los componentes utilizados y configurados para modelar el sistema lo harán únicamente en estado estable; razón por la que se ha recurrido al uso del software auxiliar mencionado, para implementar dentro del Wolfram System Modeler un sistema similar a uno real, con una parte pseudo transitoria, y una parte estable.
- Los sistemas utilizados son adiabáticos, es decir que no consideran pérdidas con el ambiente ni por fricción. Por lo tanto, se podría asumir una eficiencia del 100%.
- El tiempo de simulación configurado para ambos consumidores de vapor, será el tiempo de cocción total en cada uno, es decir 4.5 horas para la marmita y 3.9 horas para el horno.
- Para simular el comportamiento de cada consumidor de vapor, se realizaron dos modelos por separado, pues no hay herramientas que permitan la división del flujo de vapor.

Finalmente, los resultados de la simulación que se esperarán obtener son los que indiquen el comportamiento de nuestros 3 subsistemas de estudio: generación de vapor, distribución de vapor, y consumo de vapor.

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección se mostrará los resultados obtenidos mediante el proceso de simulación, junto con su análisis, para finalmente generar conclusiones y recomendaciones.

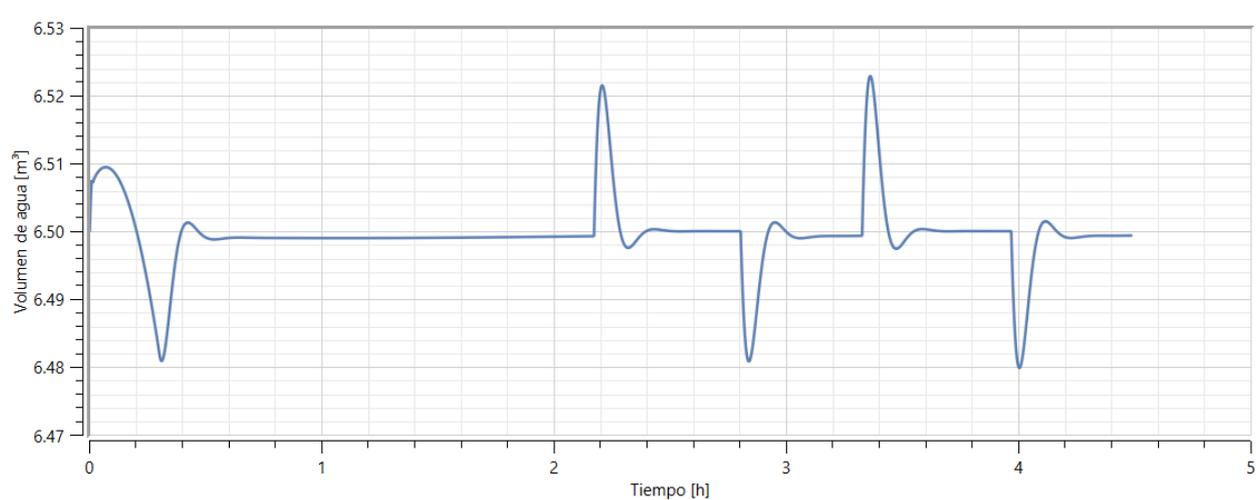
#### 3.1 Resultados obtenidos

En esta sección se analizarán y comentarán los resultados obtenidos después del proceso de simulación, que reflejan el comportamiento de nuestro sistema de vapor, con los dos consumidores de vapor en cuestión; pero manteniendo el enfoque únicamente en el estado estable del sistema. Es decir, en el caso de la marmita, cuando la temperatura del agua esté oscilando entre los 87 y 83 grados centígrados; y en el caso del horno, cuando la temperatura del aire esté oscilando entre los 86 y 80 grados centígrados.

##### 3.1.1 Resultados obtenidos con la marmita como consumidor de vapor.

Los resultados arrojados por la simulación muestran el comportamiento de los componentes que pertenecen a los tres subsistemas de estudio, y que a su vez conforman el sistema de vapor principal.

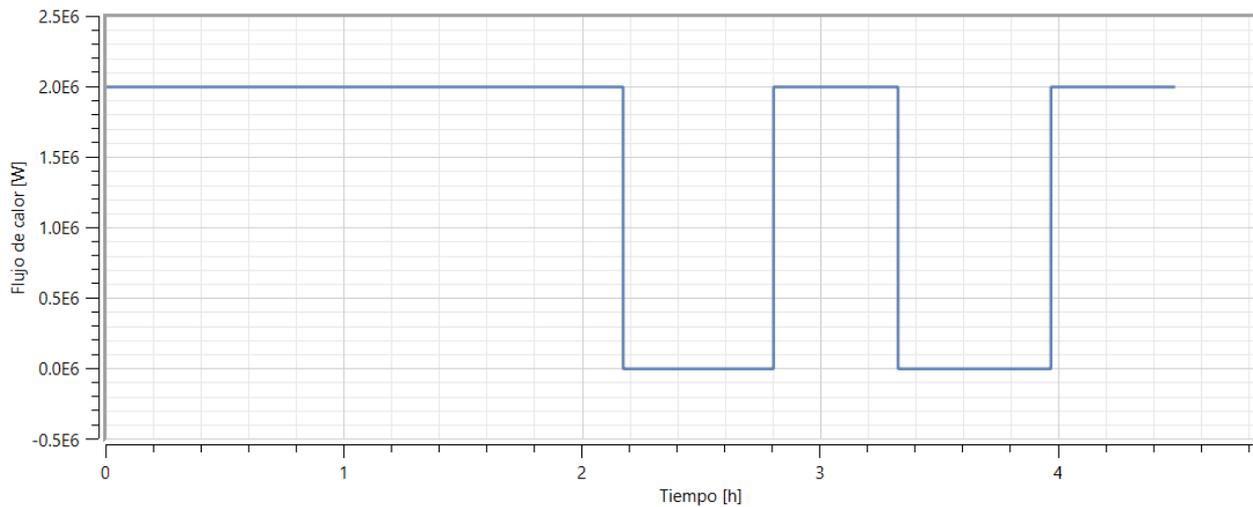
En la Figura 13 se puede observar que se ha logrado controlar el nivel del agua en los  $6.5 m^3$ . Por lo tanto, se podría inferir en que el funcionamiento del sistema de control que ha sido aplicado para el suministro de agua en la caldera ha sido modelado correctamente.



**Figura 13.** Volumen de agua en la Caldera a lo largo del tiempo con la marmita como consumidor de vapor.

**Fuente:** Propia

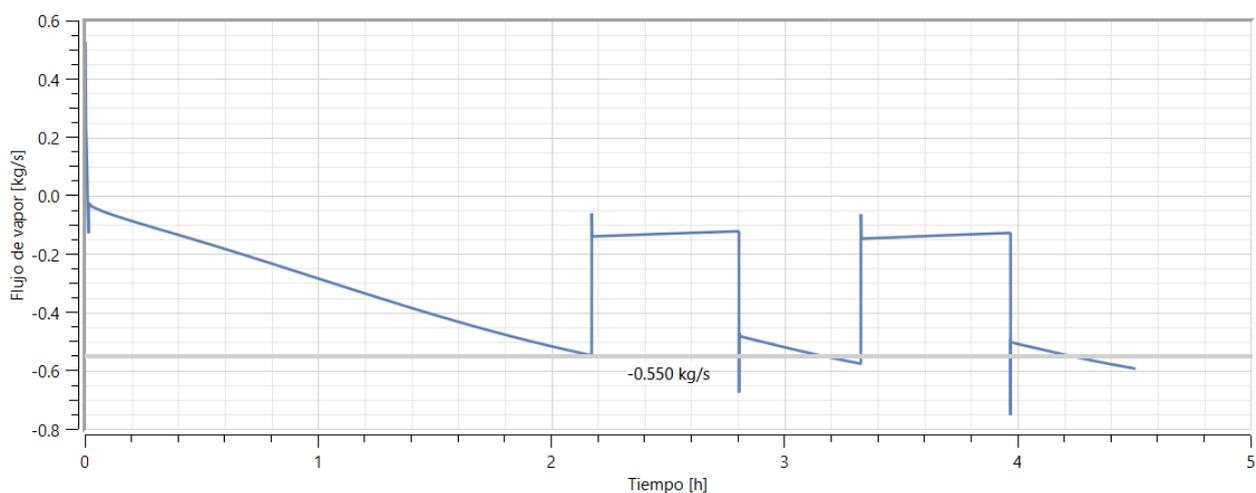
En la Figura 14 se puede observar que el comportamiento del quemador es el esperado en un principio, pues en función de los tiempos de calentamiento y enfriamiento del agua de la marmita, que se pueden observar en la Figura 17, el quemador se enciende y se apaga para satisfacer con la necesidad del control de la temperatura.



**Figura 14.** Flujo de calor que sale del quemador con la marmita como consumidor de vapor.

**Fuente:** Propia

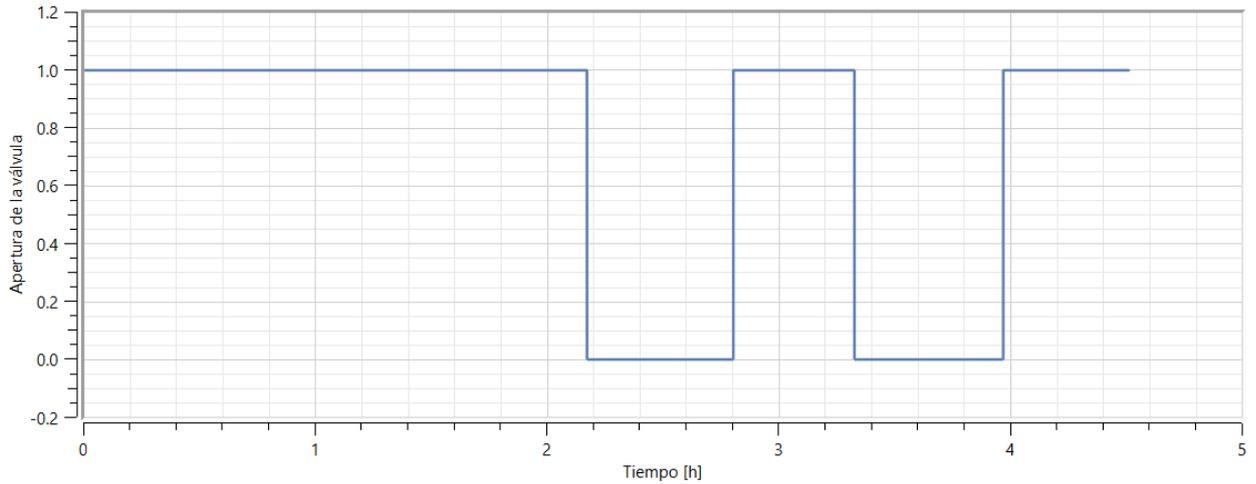
En la Figura 15 se puede observar que la caldera deja de producir vapor cuando empiezan los periodos de enfriamiento observados en la Figura 17, y vuelve a producir vapor cuando inician los procesos de calentamiento. Cabe recalcar en esta parte, que el signo negativo que se evidencia en la Figura 15, indica que el flujo de vapor está saliendo de la caldera.



**Figura 15.** Flujo de vapor saliente de la caldera a lo largo del tiempo con la marmita como consumidor de vapor.

**Fuente:** Propia

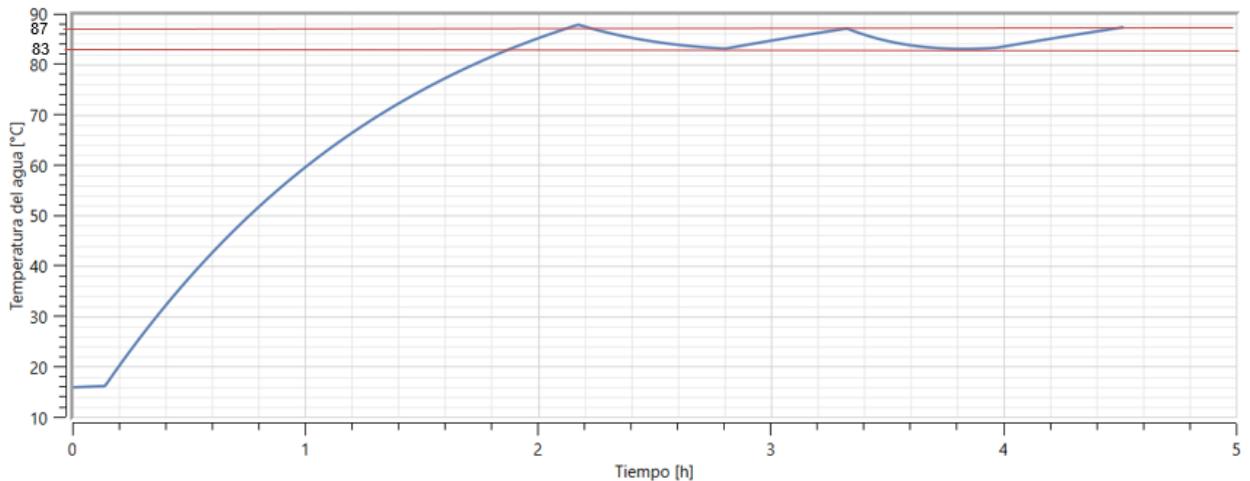
En la Figura 16 se puede observar que la válvula permite el flujo de vapor hacia la marmita cuando inician los periodos de calentamiento, y lo detiene cuando inician los periodos de enfriamiento, donde ya no es necesario el suministro de energía.



**Figura 16.** Apertura de la válvula en función del tiempo con la marmita como consumidor de vapor.

**Fuente:** Propia

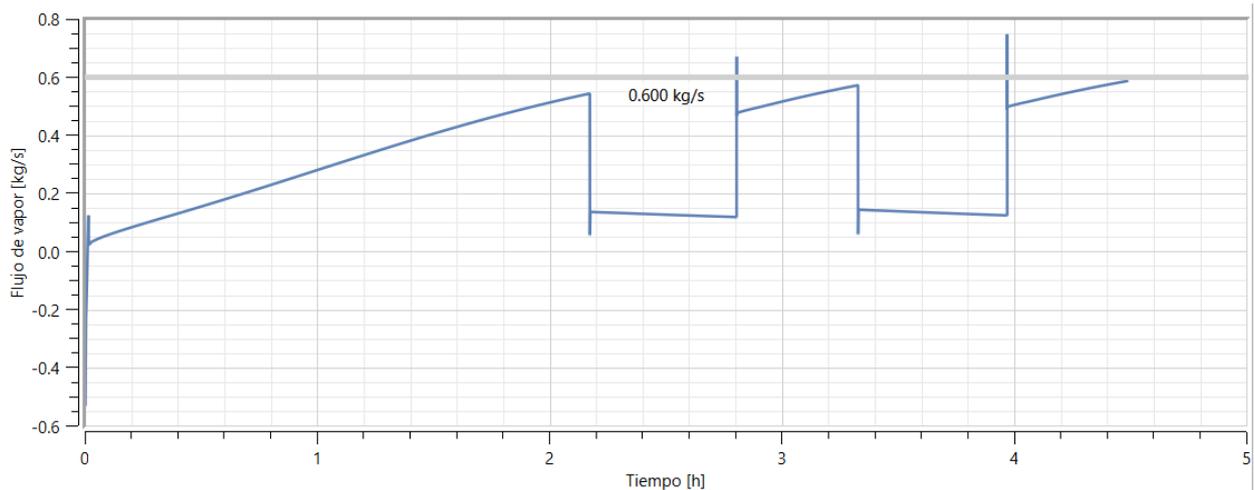
En la Figura 17 se puede observar que la temperatura del agua de la marmita se mantiene en su mayoría dentro del rango de control de temperatura, durante el proceso de cocción. Y se puede evidenciar que, en los periodos de enfriamiento, la curva tiene una tendencia similar a la que tendría una curva de enfriamiento teórica.



**Figura 17.** Variación de la temperatura del agua dentro de la marmita.

**Fuente:** Propia

En la Figura 18 se puede evidenciar que el flujo de vapor que pasa por el serpentín es el mismo que sale de la caldera. Además, los intervalos en los que deja de existir un flujo coinciden con los intervalos en que la válvula deja de permitir el paso de vapor.



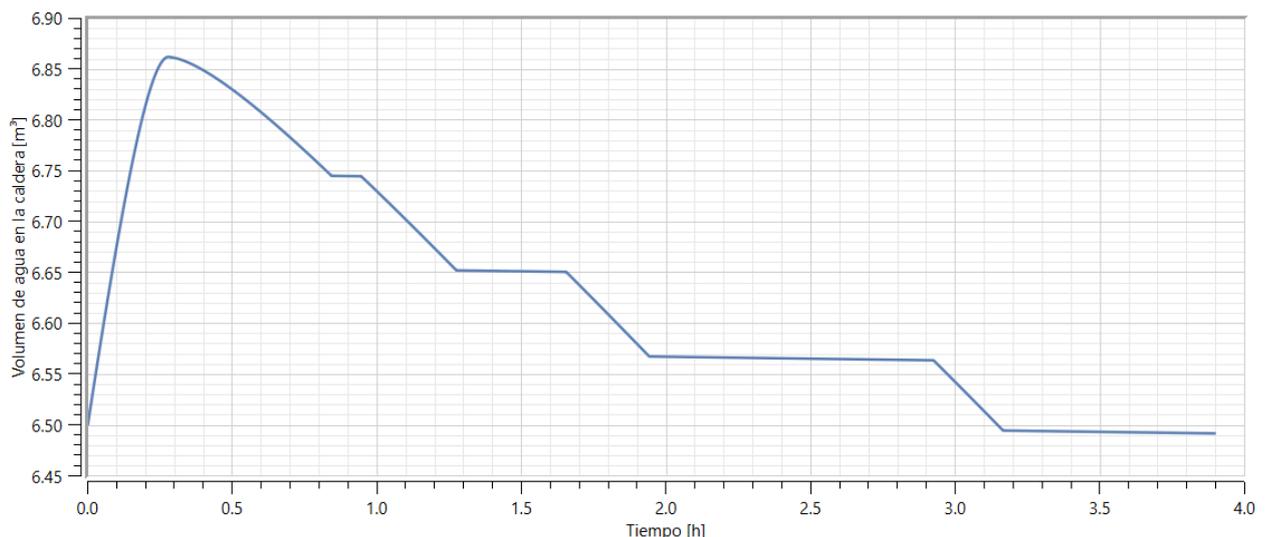
**Figura 18.** Flujo de vapor por el serpentín a lo largo del tiempo con la marmita como consumidor de vapor.

**Fuente:** Propia

### 3.1.2 Resultados obtenidos con el horno como consumidor de vapor

Al igual que con la marmita, los resultados obtenidos mediante la simulación nos permiten observar el comportamiento de los componentes que forman el sistema de vapor, con el horno como consumidor de vapor.

En la Figura 19 se puede evidenciar que el nivel de agua dentro de la caldera, a lo largo del proceso, no logra estabilizarse del todo sino hasta la última hora. Sin embargo, sus valores no están muy alejados de lo requerido.

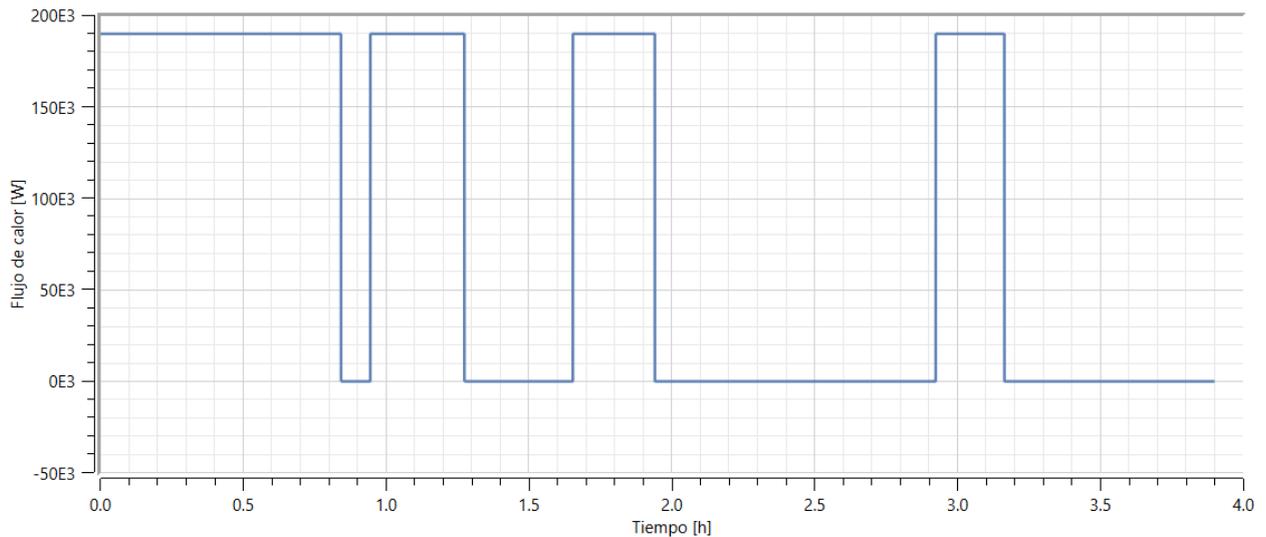


**Figura 19.** Volumen de agua en la Caldera a lo largo del tiempo con el horno como consumidor de vapor.

**Fuente:** Propia

En la Figura 20 se puede observar que el comportamiento del quemador sí se da según lo esperado, pues se enciende y apaga según la demanda de energía, dentro de los intervalos

establecidos.

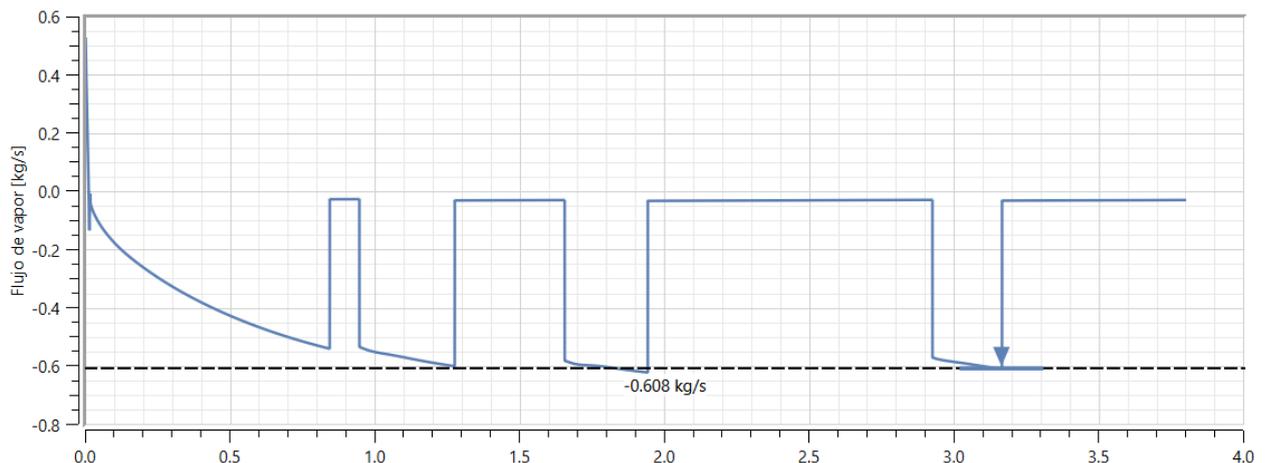


**Figura 20.** Flujo de calor que sale del quemador con el horno como consumidor de vapor.

**Fuente:** Propia

En la Figura 21 se puede observar que cuando el quemador se apaga, la caldera deja de producir vapor, y lo contrario cuando el quemador se prende.

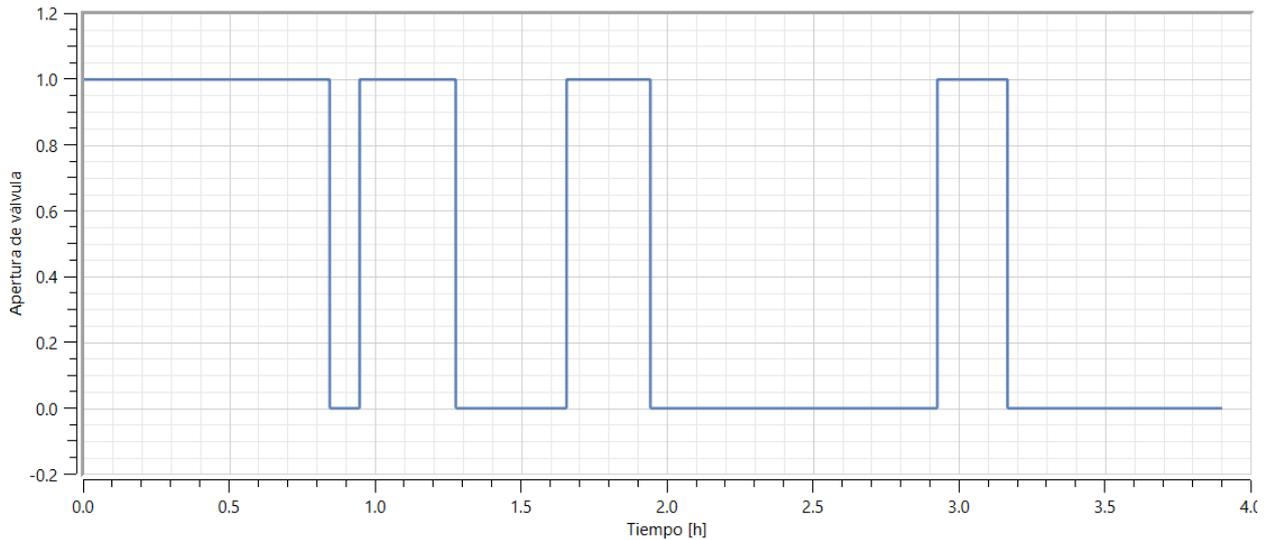
Se puede evidenciar también que el flujo que sale es mayor en este caso, en comparación con el modelo en el que el equipo de consumo es la marmita, mostrando la coherencia del proceso, pues eso es lo que se esperaba en un principio, ya que en este caso el vapor fluye por una tubería con un diámetro mayor.



**Figura 21.** Flujo de vapor saliente de la caldera a lo largo del tiempo con el horno como consumidor de vapor.

**Fuente:** Propia

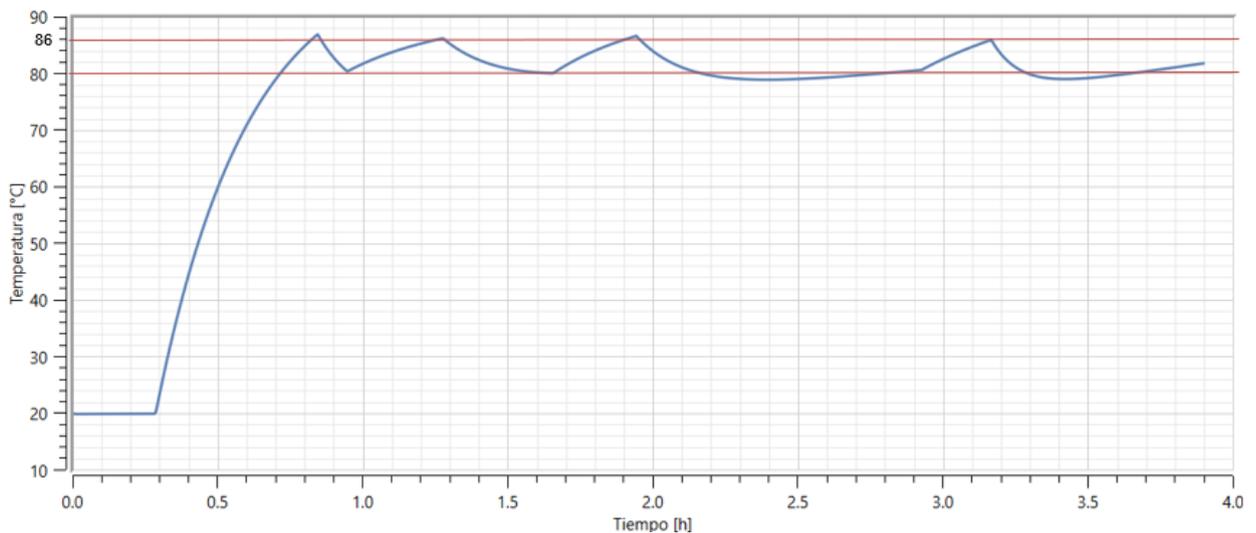
En la Figura 22 se puede evidenciar que el comportamiento de la válvula es el esperado, pues su apertura varía de acuerdo con el requerimiento energético, y está totalmente sincronizada con el encendido y apagado del quemador.



**Figura 22.** Apertura de la válvula en función del tiempo con el horno como consumidor de vapor

**Fuente:** Propia

En la Figura 23 se puede evidenciar que la temperatura del aire se mantiene dentro de los límites deseados, y de la misma manera, la forma de la curva de temperatura en los periodos de enfriamiento mantiene la tendencia que tendría una curva de enfriamiento teórica. Además, se observa que los periodos de calentamiento y enfriamiento guardan la relación esperada con los periodos de encendido y apagado del calentador, y de apertura y cierre de la válvula respectivamente.

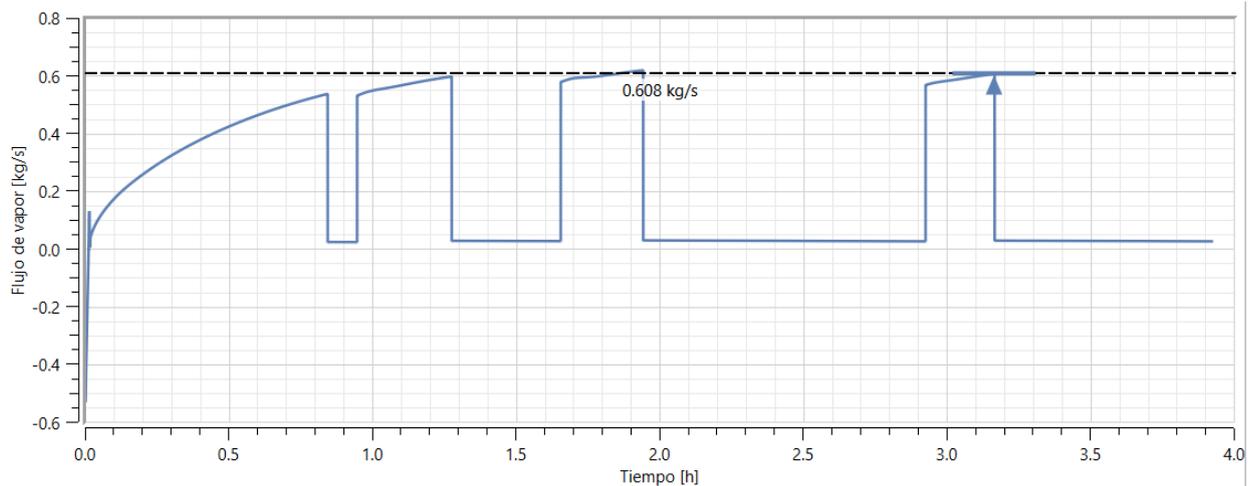


**Figura 23.** Variación de la temperatura del aire del horno a lo largo del tiempo

**Fuente:** Propia

En la Figura 24 se puede observar que el flujo de vapor a través del tubo de inyección es el mismo que el flujo que sale de la caldera en la Figura 21, evidenciando la característica de los elementos de ser adiabáticos, al no presentarse pérdidas.

También se puede observar que los periodos en los que el flujo de vapor es nulo, coincide con los periodos en los que el quemador se apaga y la válvula cierra el paso del flujo de vapor.



**Figura 24.** Flujo de vapor por el tubo de inyección a lo largo del tiempo

**Fuente:** Propia

### 3.1.3 Validación de resultados

El método para validar los resultados que se han obtenido mediante la simulación, es seleccionar los que puedan ser comparables con los de un sistema real, y según el porcentaje de error que exista entre ambos, determinar si los resultados de la simulación se consideran fiables o no.

Teniendo en cuenta las consideraciones explicadas en la sección 2.5, que hacen que el modelo del sistema no trabaje exactamente bajo las condiciones que un sistema real, se tomarán como aceptables los resultados de la simulación mientras estos no superen un error del 20% al compararlos con valores reales.

El sistema con el que se comparará será el que se ha usado como referencia para configurar los parámetros en el modelamiento, ya que así se garantiza que los resultados obtenidos en ambos casos (el real y el simulado) se han obtenido bajo las mismas condiciones de trabajo.

#### **Validación de resultados obtenidos con la marmita como consumidor de vapor**

Para validar los resultados obtenidos al simular el comportamiento del sistema, utilizando la marmita como consumidor de vapor, se comparan los valores obtenidos del tiempo de cocción total y el flujo de vapor generado, con los valores del sistema descrito en la documentación revisada sobre un sistema real. La Tabla 19 muestra el error existente entre estos dos valores.

**Tabla 19.** Error entre los datos simulados y los documentados, con la marmita como consumidor de vapor.

Parámetro	Dato planta real	Dato simulación	Error
Tiempo de cocción	2.4 horas	2.28 horas	5%
Flujo de vapor generado	0.55 kgv/s	0.65 kgv/s	15%

**Fuente:** Propia

En el Anexo 1 se indica que con la ayuda del software COMSOL Multiphysics, se logró simular el proceso de cocción en la marmita y determinar que, al mantener un control de temperatura

entre los 87 y 83 grados centígrados, el tiempo que demora la comida en alcanzar los 74 grados centígrados, una vez ha empezado el estado estable, es de 2.4 horas.

Por otra parte, en el proceso de cocción del sistema de referencia utilizado, perteneciente a la planta de producción de Pronaca, se tiene que el tiempo de cocción en estado estable es de 2.28 horas, al mantener la variación de la temperatura dentro de los mismos rangos [11].

Por lo tanto, existe un error del 5% entre ambos valores.

En la Figura 15 se puede observar que, durante los periodos de generación de vapor de la caldera, en promedio el flujo de vapor generado es de 0.55 kgv/s.

En el documento de referencia utilizado, indica que el flujo de vapor generado por la caldera del sistema real es de 2352.27 kgv/h, lo que es equivalente a 0.65 kgv/s [11].

Por lo tanto, existe un error del 15% entre ambos valores.

Siendo estos los únicos resultados de la simulación comparables con los valores del sistema real, y al haber obtenido porcentajes de error menores al 20%, se validan los resultados obtenidos mediante la simulación del sistema de vapor, con la marmita como consumidor

#### **Validación de resultados obtenidos con el horno como consumidor de vapor**

Para este caso, la información con la que se cuenta para poder comparar los resultados obtenidos es escasa. Por lo tanto, el único resultado de la simulación, que se podrá comparar con los valores de un sistema real, es el tiempo de cocción.

La Tabla 20 muestra el error entre los valores obtenidos por la simulación y los obtenidos a partir de la documentación revisada.

**Tabla 20.** Error entre los tiempos de cocción simulados y los documentados, con el horno como consumidor de vapor.

<b>Parámetro</b>	<b>Dato planta real</b>	<b>Dato simulación</b>	<b>Error</b>
Tiempo de cocción	2.86 horas	3 horas	5%

**Fuente:** Propia

En el Anexo 2, se muestra que, mediante la simulación del proceso de cocción, se determinó que, al mantener un control de temperatura entre 86 y 80 grados centígrados, el tiempo en el que la comida alcanza la cocción completa en estado estable, es de 3 horas.

Por otra parte, en el documento de referencia [19], se indica que el proceso de cocción en estado estable, al mantener la temperatura controlada en el mismo rango, se alcanza después de 2.86 horas.

Por lo tanto, existe un error del 5% entre ambos valores. Al ser este valor menor al 20%, se validan los resultados obtenidos mediante la simulación del sistema de vapor, con el horno como consumidor.

## 3.2 Conclusiones

- Se simuló el comportamiento de los componentes principales de un sistema de vapor, en una planta de producción de alimentos en estado estable, y se validaron los resultados al compararlos con datos de una planta real.
- Se logró entender el funcionamiento del programa Wolfram System Modeler, para los procesos de modelación y simulación, gracias al repositorio de guías y capacitaciones de video que existen en su página oficial y al centro de ayuda que viene cargado dentro de las librerías.
- El programa tiene una interfaz intuitiva y amigable que permitió crear el modelo de un sistema de vapor que funciona en una planta de alimentos. Sin embargo, su principal limitante es que muchos de los componentes necesarios para modelar un sistema de esta naturaleza, trabajan por defecto en estado estable. De manera que no es el programa más adecuado para realizar estudios que tengan un enfoque diferente al estado estable.
- Mediante la simulación con este software, se logró observar el comportamiento de los componentes básicos de un sistema de vapor que opera en una planta de alimentos; pues se obtuvo valores de generación de vapor en la caldera, encendido y apagado del quemador, apertura de la válvula de paso de combustible, y el comportamiento de los consumidores, en estado estable.
- Con la marmita como consumidor de vapor, se observa que el flujo de vapor que pasa por el serpentín es el mismo que sale de la caldera, verificando así la característica adiabática de los componentes. Además, los intervalos en los que deja de existir un flujo coinciden con los intervalos en que la válvula se cierra. De manera que, se evidencia que la interconexión entre los componentes (caldera, válvula y serpentín), y por ende su modelamiento, han sido correctos.
- Con el horno como consumidor de vapor, se observa que el modelamiento e interconexión entre los componentes del sistema han sido correctos, pues al analizar las gráficas de apertura y cierre de válvulas, encendido y apagado del quemador, y flujos de vapor, se evidencia que existe total coherencia y sincronización.
- El funcionamiento del sistema de control de ingreso de agua hacia la caldera se modeló correctamente, pues a lo largo de todo el proceso de cocción de alimentos se mantiene el nivel de agua en  $6.5 \text{ m}^3$ , que es el nivel requerido planteado inicialmente.
- Al comparar el tiempo de cocción necesario para que los alimentos alcancen la temperatura final requerida, se observó que existe un error del 5% entre los valores obtenidos mediante simulación, y los documentados en el proceso de la planta de Pronaca, cuando la marmita funciona como consumidor de vapor.
- Al comparar el flujo de vapor generado durante el proceso de cocción, se observó que

existe un error del 15% entre los valores arrojados por la simulación, y los documentados en el proceso de la planta de Pronaca, cuando la marmita funciona como consumidor de vapor.

- Al comparar el tiempo de cocción necesario para que los alimentos alcancen la temperatura final requerida, se observó que existe un error del 5% entre los valores obtenidos mediante simulación, y los documentados en el proceso de la planta de Pronaca, cuando el horno funciona como consumidor de vapor.
- Los resultados obtenidos mediante la simulación, sobre tiempos de cocción y flujos de vapor generado durante el proceso de cocción, no excedieron el 20% de error al ser comparados con los valores obtenidos de los sistemas reportados en la bibliografía. Esto muestra que existe un buen acercamiento entre los resultados simulados y los experimentales, de manera que, se los puede considerar fiables.

### **3.3 Recomendaciones**

- Realizar una toma de datos experimentales de temperatura en los equipos de consumo, registrando la ubicación exacta de los puntos de toma de datos, para poder realizar la simulación tomando las mismas ubicaciones para los puntos de análisis, y así poder tener valores más confiables para la validación de resultados.
- Implementar un componente que represente a la caldera, que sea capaz de mostrar su comportamiento desde que empieza el calentamiento del agua hasta que el vapor se genera, mediante la modificación del código fuente de Wolfram. Esto demanda del conocimiento de programación en lenguaje Modelica, pero ayudaría a desarrollar un modelo más robusto.
- Expandir la base de datos experimentales para validación de resultados, como flujo de vapor que pasa por las tuberías, cantidad de calor generado en los quemadores, o presión de vapor en los equipos de consumo, pues estos datos se pueden observar en la simulación, y podrían servir para una validación de resultados más elaborada.
- Se podría realizar un acople entre los códigos de COMSOL y Wolfram de manera externa, para poder intercambiar los datos de temperatura, y evitar hacerlo de manera manual como fue en el caso de este proyecto, para optimizar los tiempos de simulación.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Rubio-González, "Combustión y Generación de Vapor," 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/333903191>
- [2] E. Worrell, "Steam systems in industry: Energy use and energy efficiency improvement potentials," 2001. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/255271068>
- [3] Dr. Sam C. M. Hui, "Steam Systems." Accessed: Dec. 09, 2023. [Online]. Available: <https://n9.cl/pgz2x>
- [4] J. L. Palacios, A. Peña, and V. Hidalgo, "Técnicas de Gestión Energéticas en Sistemas de Vapor," *Revista Politécnica*, vol. 35, no. 3, Feb. 2015.
- [5] E. Rivera, "Mejoramiento del sistema de abastecimiento de vapor para la planta ferrero del ecuador utilizando PLC," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2006. Accessed: Dec. 09, 2023. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/325?mode=full>
- [6] TRACTIAN, "¿Cómo funcionan las calderas industriales?" Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://tractian.com/es/blog/como-funcionan-las-calderas-industriales>
- [7] Portal electromecánico, "Caldera Acuotubular Esquema." Accessed: Dec. 09, 2023. [Online]. Available: [https://portalelectromecanico.com/CURSOS/MaquinasMecanicas/calderas\\_acuotubulares.html](https://portalelectromecanico.com/CURSOS/MaquinasMecanicas/calderas_acuotubulares.html)
- [8] Unox, "Trampa de Vapor Termostática." Accessed: Dec. 10, 2023. [Online]. Available: <https://unox.com.tr/es/trampa-termostatica/>
- [9] TLV, "Selección de Trampas de Vapor: Cómo la Aplicación Afecta la Selección." Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.tlv.com/es-mx/steam-info/steam-theory/steamtrap-basics/steam-trap-selection-part-1>
- [10] Vaprest, "Las calderas industriales de vapor y sus beneficios en la industria." Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: [https://vaprest.com/beneficios-calderas-industriales-vapor/#Utilidad\\_de\\_las\\_calderas\\_en\\_la\\_industria](https://vaprest.com/beneficios-calderas-industriales-vapor/#Utilidad_de_las_calderas_en_la_industria)
- [11] J. Luis and P. Encalada, "Auditoría energética de la caldera y el sistema de distribución de vapor de la planta de elaborados y embutidos de Pronaca," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.
- [12] EngineerExcel, "Steady State Systems." Accessed: Dec. 26, 2023. [Online]. Available: <https://engineerexcel.com/steady-state-systems/>
- [13] Wolfram, "Características Destacadas de System Modeler." Accessed: Dec. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.wolfram.com/system-modeler/features/index.php>
- [14] Wolfram, "Cómo System Modeler se compara con otros sistemas de modelado." Accessed: Dec. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.wolfram.com/system-modeler/modeling-tools-comparison/>
- [15] Wolfram, "Modelica: Fluid-Documentación del Modelador de Sistemas." Accessed: Dec. 27, 2023. [Online]. Available: <https://reference.wolfram.com/system-modeler/libraries/Modelica/Modelica.Fluid.html>
- [16] Wolfram System Modeler, "Wolfram System Modeler help," 14.0.
- [17] Calsat, "Cantidad de agua necesaria en una caldera." Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://calsat.es/cantidad-de-agua-necesaria-en-una-caldera/>
- [18] A. Boghossian, J. Brown, and S. Zak, "Control de P, I, D, PI, PD y PID." Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://n9.cl/p8ldt>
- [19] Q. Aguas, C. Andrés, V. Váscquez, and S. Xavier, "Diseño e implementación de un sistema de control automático para dos hornos a vapor utilizados para la elaboración de embutidos."
- [20] J. Carlos, A. Nacimba, J. Alexandra, and M. Villarreal, "Modelado matemático y simulación de la transferencia de calor de un lecho fijo para el núcleo del reactor nuclear 'fixed bed nuclear reactor (FBNR)," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2017.

## 5 ANEXOS

### 5.1 ANEXO 1: Modelamiento y simulación de la Marmita en el software COMSOL Multiphysics

Para la simulación de la marmita y horno, se ha decidido utilizar el programa COMSOL Multiphysics, ya que, en este se puede modelar la geometría del sistema mediante herramientas CAD, y configurar las condiciones iniciales en la misma [20]. Para ello se siguen el procedimiento que se detalla a continuación:

Primero, se debe seleccionar la dimensión del espacio de modelamiento mediante la selección de la opción “asistente de modelo” y luego la opción “2D” como se muestra en la Figura 25.

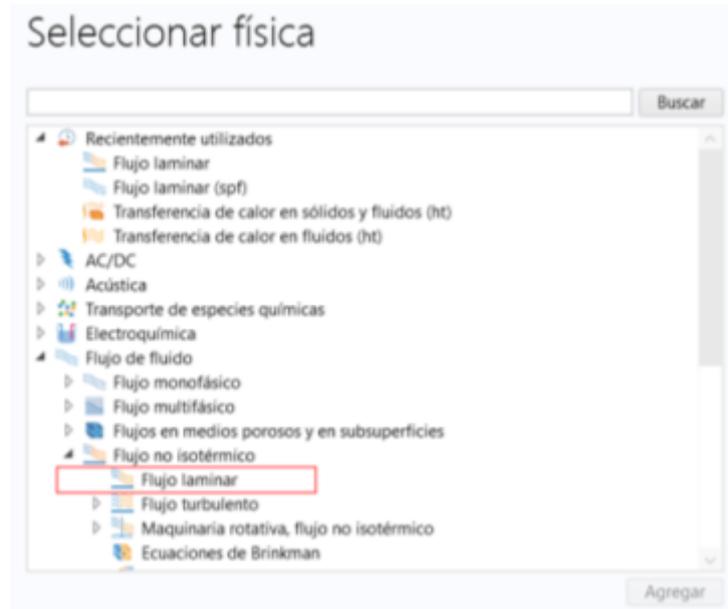
En este caso se realizará una modelación en 2D debido a que el modelo es simétrico, por lo tanto, trabajar con dos dimensiones es suficiente.



**Figura 25.** Selección de la dimensión del espacio.

**Fuente:** Propia

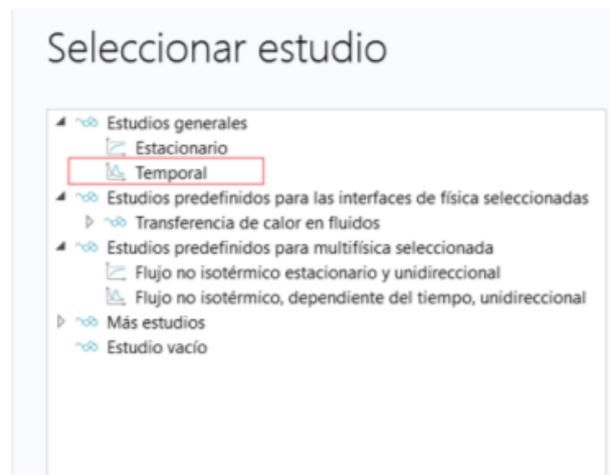
Posteriormente, se debe seleccionar la física del modelo, haciendo click en la opción “Flujo laminar” como se observa en la Figura 26.



**Figura 26.** Selección de la física del modelo

**Fuente:** Propia

Luego, se selecciona el estudio que se desea realiza, que en este caso es “temporal” como se observa en la Figura 27.

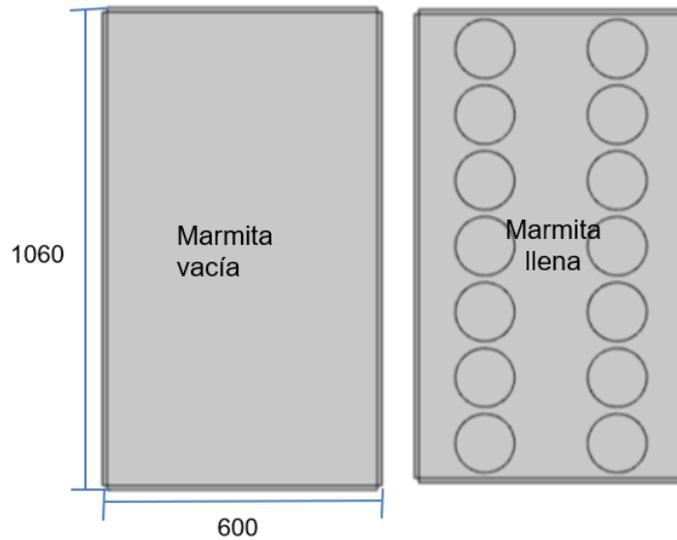


**Figura 27.** Selección del estudio

**Fuente:** Propia

Posteriormente, se deben crear las geometrías de los equipos de consumo, de acuerdo a las características deseadas. Cabe recalcar, que para este caso fue necesario crear una geometría para el proceso de calentamiento, y una geometría diferente para el caso de la cocción, pues en esta última fue necesario considerar ya la comida dentro de la marmita. En ambos casos, el tamaño de la geometría que representa a la marmita fue de 1060x600 mm.

En la Figura 28 se puede observar las dos geometrías que se han generado.



**Figura 28.** Geometrías generadas para la simulación de la marmita.

**Fuente:** Propia

El material del que están compuestas las paredes es Acero AISI 316, el fluido de trabajo es agua, y la comida es jamón.

Las propiedades para el acero y el agua vienen suministradas por defecto en las librerías del software, y para el jamón se definieron manualmente.

En la Tabla 21 se detallan las propiedades del acero.

**Tabla 21.** Propiedades del Acero AISI 316

Propiedad	Valor
Permeabilidad relativa	1
Conductividad eléctrica [S/m]	4.032e6
Coeficiente de expansión térmica [1/K]	12.3e-6
Capacidad calorífica con presión constante [J/(kg*K)]	475
Permitividad relativa	1
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	7850
Conductividad térmica [W/(m*K)]	44.5

**Fuente:** Propia

En la Tabla 22 se detallan las propiedades del Jamón.

**Tabla 22.** Propiedades del Jamón

Propiedad	Valor
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	1030
Conductividad térmica [W/m – °C]	0.480
Difusividad térmica [m <sup>2</sup> /s]	0.14e-6
Calor específico [kJ/kg-K]	3.48

**Fuente:** Propia

En la Tabla 23 se detallan las propiedades del agua.

**Tabla 23.** Propiedades del Agua

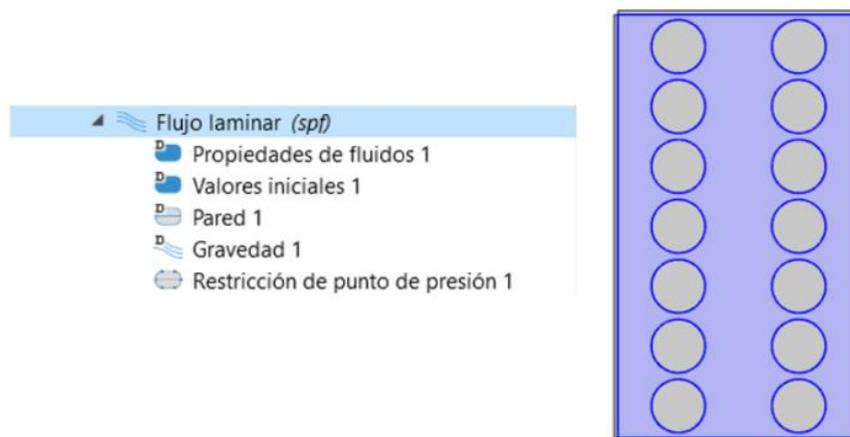
Propiedad	Valor
Viscosidad dinámica [mPa·s ]	1.0016
Conductividad eléctrica [μS/cm.]	0.055
Capacidad calorífica con presión constante [J/g°C]	4186
Densidad [kg/m³]	997

**Fuente:** Propia

El número de piezas de jamón, que en este caso están representadas por los círculos, fue calculado, considerando que la cantidad de jamón que debe existir es de 1/3 con respecto a la a la cantidad del fluido [11], por lo tanto, se debería tener un volumen del jamón de  $0.167 \text{ m}^3$ .

Al multiplicar este valor del volumen del jamón, por la densidad del jamón, se obtiene que el peso de jamón a cocinar es de 172 kg.

Como se indica en la Figura 29 para el flujo laminar es necesario definir un área de control, que en este caso es el agua.



**Figura 29.** Área de control para el flujo laminar.

**Fuente:** Propia

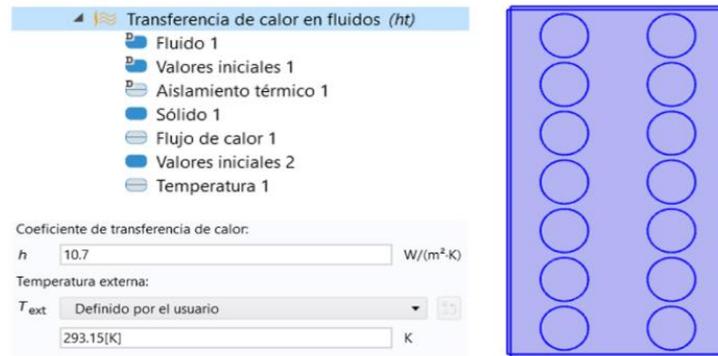
En el módulo de transferencia de calor se seleccionan como sólidos a la comida y las paredes de la marmita, mientras que el fluido será el agua. La configuración de este módulo necesita de la inserción de algunos parámetros, como se puede observar en la Figura 30.

En la sección de “Valores iniciales 1” se debe indicar las condiciones iniciales de las paredes de la marmita y del agua.

En la sección de “Flujo de calor 1” se debe indicar el coeficiente de convección, que para este caso tendrá un valor de  $10.7 \text{ W/m}^2\text{K}$  [11], y la temperatura inicial que en este caso será de 293.15 K.

Finalmente, en “Valores iniciales 2” se debe introducir la temperatura de los alimentos que en un inicio será de  $11.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , y la “Temperatura 1” que se coloca en la base de la marmita, para simular

el serpentín, y que tendrá un valor de 100°C.

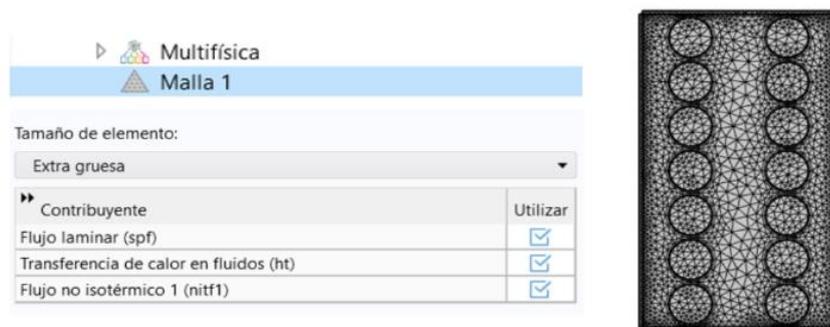


**Figura 30.** Configuración del módulo de Transferencia de calor

**Fuente:** Propia

Para los procesos de enfriamiento, se desactiva la “Temperatura 1”, para simular que se ha apagado la caldera y que el vapor ya no circula por el serpentín.

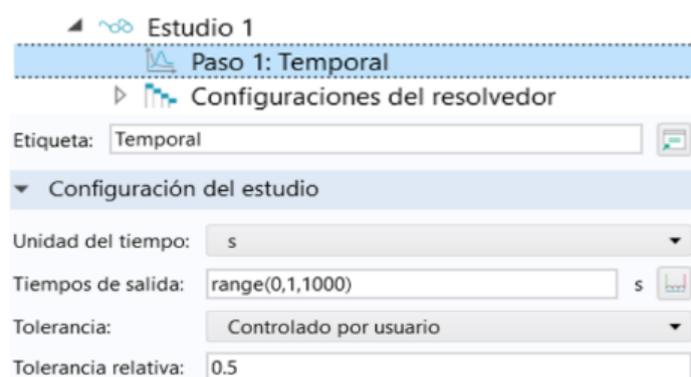
En la creación del mallado del modelo, se lo realiza como se indica en la Figura 31.



**Figura 31.** Creación del mallado del modelo.

**Fuente:** Propia

Para este caso, se considera una malla extra gruesa, debido a la baja complejidad del modelo. La configuración del estudio depende de la precisión que se requiera tener, y el paso del tiempo depende de lo que se necesite ver en los resultados de la simulación. En este caso, se ha considerado un paso de 1 segundo y una tolerancia relativa de 0.5, como se muestra en la Figura 32.



**Figura 32.** Configuración del “Estudio 1”

Fuente: Propia

Para la obtención de los resultados se deben designar los puntos dentro de la geometría, de donde se necesite conocer los datos arrojados por la simulación. Esto se realiza como se indica en la Figura 33.

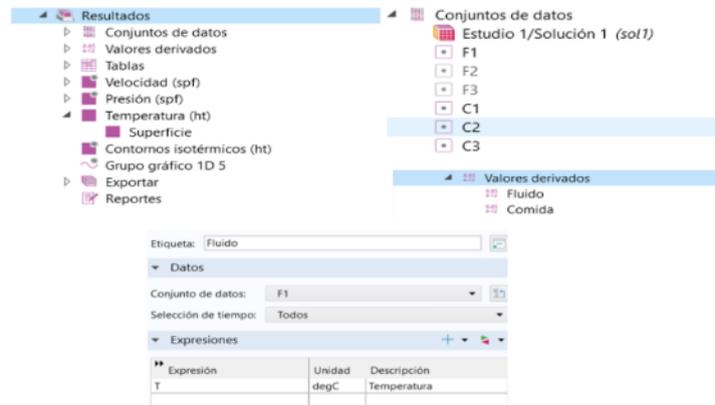


Figura 33. Selección de puntos para obtención de datos.

Fuente: Propia

Una vez seleccionados los puntos y obtenidos los datos de interés, se los registran para el estudio en desarrollo.

Para este estudio, los datos obtenidos sobre la temperatura de agua de la marmita y la comida a lo largo del tiempo se presentan en la Tabla 24.

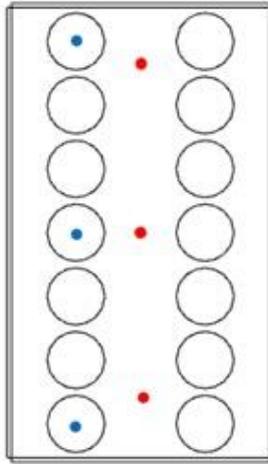
Tabla 24. Tiempos de los procesos de calentamiento y enfriamiento en la marmita

Proceso	Tiempo [s]	Temperatura del agua [°C]	Temperatura de la comida [°C]
Calentamiento	7815	87.8	11.8
Enfriamiento	2273	83.6	30.06
Calentamiento	1880	86.09	42.77
Enfriamiento	2311	83.6	65.77
Calentamiento	2049	87.8	73.74

Fuente: Propia

Cabe recalcar que los resultados tabulados sobre temperatura corresponden al promedio de la temperatura de 3 puntos de análisis en cada instante de tiempo.

Estos puntos se observan en la Figura 34.



**Figura 34.** Puntos de análisis de temperatura en la marmita

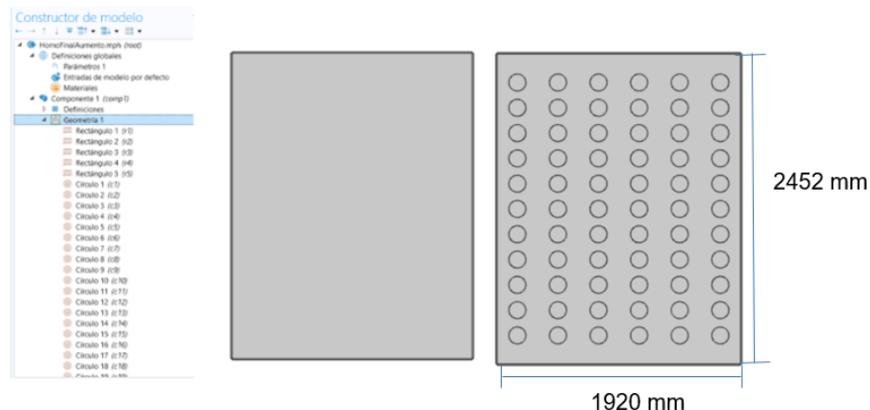
**Fuente:** Propia

Los puntos de color rojo son los puntos en los que se obtuvo las temperaturas del agua de la marmita para realizar el promedio, mientras que los puntos de color azul representan los puntos en los que se obtuvo las temperaturas de la comida.

## 5.2 ANEXO 2: Modelamiento y simulación del horno en el software COMSOL Multiphysics

Para el modelamiento y simulación del horno se deben seguir los mismos pasos que en la sección 5.1, hasta llegar a la configuración del tipo de estudio.

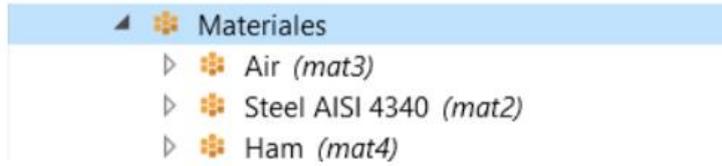
A partir de ahí, para definir la geometría se debe considerar las dimensiones explicadas en la sección 2.3, y como se muestra en la Figura 35, también se realizará una geometría con comida y la otra sin comida, por la misma razón que se explicó para la marmita.



**Figura 35.** Geometrías generadas para la simulación del horno

**Fuente:** Propia

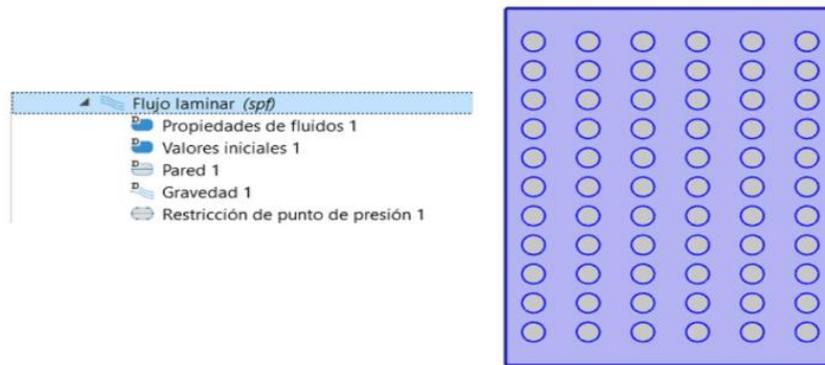
Como se muestra en la Figura 36, los materiales seleccionados para este caso son los mismos que en la marmita, excepto por el fluido de trabajo, que para este caso es el aire.



**Figura 36.** Materiales utilizados para el modelo

**Fuente:** Propia

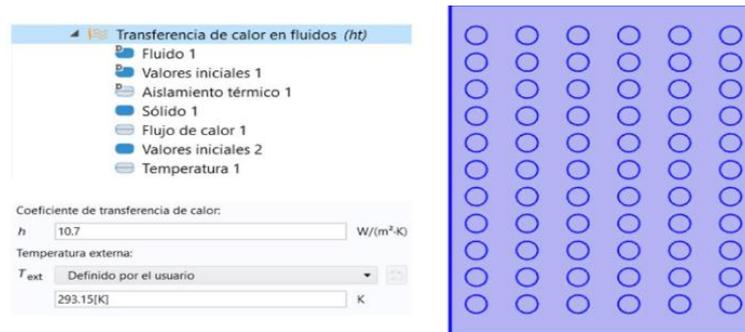
La configuración del flujo laminar se lo realiza de la misma forma que en el caso de la marmita, como se muestra en la Figura 37.



**Figura 37.** Área de control para el flujo laminar

**Fuente:** Propia

Para configurar el módulo de transferencia de calor, como se muestra en la Figura 38, se mantienen los valores indicados para el modelo de la marmita, con la única diferencia que ahora la “Temperatura 1” irá en la pared superior del horno.

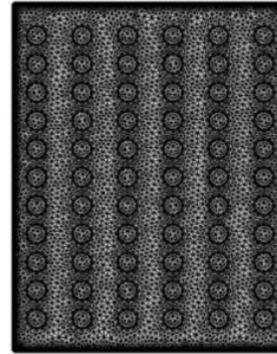


**Figura 38.** Configuración del módulo de transferencia de calor

**Fuente:** Propia

Para las etapas de enfriamiento, se desactiva la “Temperatura 1”, para simular que se ha apagado la caldera y que ya no existe paso del vapor hacia el horno.

En este caso el mallado también se configura de la misma forma, como se puede observar en la Figura 39.



**Figura 39.** Configuración del mallado del modelo.

**Fuente:** Propia

Para la configuración del estudio, y la selección de los puntos para la obtención de los datos, se debe seguir el proceso exactamente como fue descrito para la marmita.

Finalmente, los resultados obtenidos sobre las temperaturas del aire y de la comida, fueron los detallados en la Tabla 12.

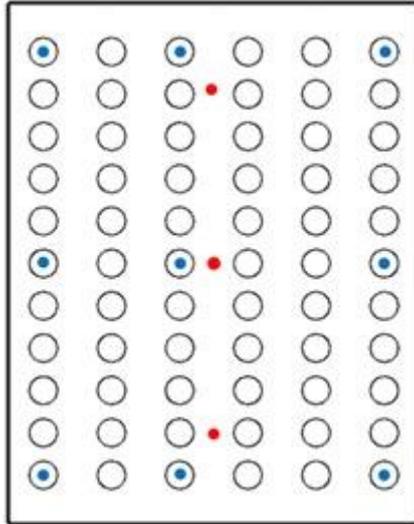
**Tabla 12.** Tiempos de los procesos de calentamiento y enfriamiento en el horno

Proceso	Tiempo [s]	Temperatura del aire [°C]	Temperatura de la comida [°C]
Calentamiento	3034	86	11.8
Enfriamiento	369	80	20.32
Calentamiento	1185	86	29.69
Enfriamiento	1367	80	37.75
Calentamiento	1033	86	46.52
Enfriamiento	3539	80.6	57.24
Calentamiento	865	86	66.79
Enfriamiento	2528	82.62	74.28

**Fuente:** Propia

Del mismo modo, es importante recalcar que los valores de temperatura corresponden al promedio de la temperatura de 3 puntos de análisis para el caso del aire del horno, y 9 puntos para el caso de la comida, en cada instante de tiempo.

La ubicación de estos puntos se observa en la Figura 40.



**Figura 40.** Puntos de análisis de temperatura en el horno

**Fuente:** Propia