

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 TRANSITORIO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

JHOSUE ANDRÉS VERA IÑIGA

jhosue.vera@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. JOSÉ LUÍS PALACIOS ENCALADA Ph.D.

jose.palacios@epn.edu

DMQ, agosto 2024

CERTIFICACIONES

Yo, JHOSUE ANDRÉS VERA IÑIGA 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.

JHOSUE ANDRÉS VERA IÑIGA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JHOSUE ANDRÉS VERA IÑIGA, bajo mi supervisión.

JOSÉ LUÍS PALACIOS ENCALADA
DIRECTOR

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.

JHOSUE ANDRÉS VERA IÑIGA

JOSÉ LUÍS PALACIOS ENCALADA

DEDICATORIA

A mis padres, Diego y Paola, por su apoyo incondicional durante este trayecto, siempre entregándome sus consejos que me permitieron crecer personal y profesionalmente con honestidad y mucho esfuerzo.

A mi abuela, Zoila, por sus sabios consejos, amor y ayuda durante mi crecimiento personal y profesional, y que pese a no seguir acompañándome sus enseñanzas permanecen como guía constante en mi vida.

A mis abuelos Pablo y Consuelo, quienes, con su amor, apoyo, y consejos han sido mi guía y aliento para perseguir mis sueños con determinación y esfuerzo.

A mi hermana, Alisson, por su apoyo y compañía durante las decisiones más importantes de mi vida y de la cuál he aprendido mucho para desarrollarme durante mis etapas de formación.

Jhosue

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a mis padres Diego y Paola, a mi hermana Alisson y mis abuelos Zoila, Pablo, Consuelo, Elsa y Edgar por su apoyo incondicional y paciencia durante este trayecto, para que pudiera cumplir con mis estudios universitarios.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, donde he realizado mi formación y crecimiento personal y profesional durante estos años. En especial Al Ph.D. José Luís Palacios y Ph.D. Juan Carlos Almachi por ofrecerme su conocimiento, colaboración y tiempo; fundamentales durante el desarrollo del proyecto.

A mis compañeros de la facultad, en especial a mi compañero Matheo por la ayuda y entrega durante la realización del proyecto, y a mis amigos Sebastián, Nikolay y Eduardo por la amistad que se ha mantenido durante estos años que nos ha permitido un apoyo mutuo durante las adversidades y felicidades en nuestra formación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	12
1.1 Objetivo general.....	12
1.2 Objetivos específicos	12
1.3 Alcance.....	13
1.4 Marco teórico.....	13
1.4.1 Sistemas de vapor	13
1.4.1.1 Estado transitorio en los sistemas de vapor	15
1.4.2 Sistemas de vapor en la industria de alimentos	15
1.4.3 Eficiencia en los sistemas de vapor	16
1.4.4 Modelado y simulación de los sistemas de vapor	17
1.4.4.1 Wolfram System Modeler	18
1.4.4.2 Ventajas del software frente a sus competidores	18
1.4.4.3 Librería Fluid	19
2 METODOLOGÍA	21
2.1 Propiedades termofísicas.....	22
2.2 Características de los elementos	23
2.2.1 Marmita	23
2.2.2 Horno.....	23
2.2.3 Caldera.....	24
2.3 Condiciones iniciales	25
2.4 Modelado y simulación de los equipos de consumo usando COMSOL Multiphysics.....	26
2.4.1 Marmita	27

2.4.1.1	Consideraciones	27
2.4.1.2	Entorno computacional	27
2.4.1.3	Modelado y simulación.....	28
2.4.2	Horno.....	29
2.4.2.1	Consideraciones	29
2.4.2.2	Entorno computacional	29
2.4.2.3	Modelado y simulación.....	30
2.5	Modelado y simulación del sistema de vapor usando Wolfram System Modeler	31
2.5.1	Consideraciones	32
2.5.2	Limitaciones.....	32
2.5.3	Integración de resultados obtenidos con COMSOL Multiphysics	33
2.5.4	Modelado y Simulación.....	33
2.5.4.1	Marmita.....	33
2.5.4.2	Horno.....	35
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
3.1	Resultados.....	37
3.1.1	Marmita mediante COMSOL Multiphysics.....	37
3.1.2	Horno mediante COMSOL Multiphysics.....	38
3.1.3	Sistema de vapor con marmita mediante Wolfram System Modeler	40
3.1.4	Sistema de vapor con horno mediante Wolfram System Modeler	43
3.1.5	Análisis de resultados.....	45
3.1.6	Validación de resultados	47
3.1.6.1	Marmita.....	47
3.1.6.2	Horno.....	48
3.2	Conclusiones	48
3.3	Recomendaciones	49
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
5	ANEXOS.....	53
5.1	Anexo A: Construcción del modelo de la marmita en COMSOL Multiphysics	53
5.2	Anexo B: Construcción del modelo del horno en COMSOL Multiphysics	60
5.3	Anexo C: Construcción del modelo del sistema de vapor con la marmita como equipo de consumo en Wolfram System Modeler	64
5.4	Anexo D: Construcción del modelo del sistema de vapor con el horno como equipo de consumo en Wolfram System Modeler	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema de vapor	14
Figura 1.2 Sistema de calefacción realizado con la librería Fluid.....	20
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología implementada	21
Figura 2.2 Diagrama del horno Aeromat VEMAG	24
Figura 2.3 Caldera pirotubular CLEAVER BROOKS.....	25
Figura 2.4 Simulación de la distribución de temperaturas en una superficie de la marmita durante diferentes tiempos usando COMSOL Multiphysics.....	28
Figura 2.5 Simulación de la distribución de temperaturas en una superficie del horno durante diferentes tiempos usando COMSOL Multiphysics.....	30
Figura 2.6 Esquema del sistema de vapor	31
Figura 2.7 Sistema de vapor con la marmita como equipo de consumo.....	34
Figura 2.8 Sistema de generación de vapor	34
Figura 2.9 Marmita como equipo de consumo de vapor	35
Figura 2.10 Sistema de vapor con el horno como equipo de consumo.....	36
Figura 2.11 Horno como equipo de consumo de vapor	36
Figura 3.1 Geometría de la marmita con los puntos para la medición de temperaturas.....	37
Figura 3.2 Variación de temperaturas en la marmita durante el calentamiento y cocción.....	38
Figura 3.3 Geometría del horno con los puntos para la medición de temperaturas	39
Figura 3.4 Variación de temperaturas en el horno durante el calentamiento y cocción.....	40
Figura 3.5 Variación de temperaturas en la marmita durante el ciclo de cocción.....	41
Figura 3.6 Flujo de vapor que entrega la caldera durante el ciclo de cocción.....	41
Figura 3.7 Apertura y cierre de la válvula principal durante el ciclo de cocción.....	42
Figura 3.8 Volumen en el interior de la caldera durante el ciclo de cocción en la marmita	42
Figura 3.9 Variación de temperaturas en el horno durante el ciclo de cocción	43
Figura 3.10 Flujo de vapor que entrega la caldera durante el ciclo de cocción.....	44
Figura 3.11 Apertura y cierre de la válvula principal durante el ciclo de cocción.....	44
Figura 3.12 Volumen en el interior de la caldera durante el ciclo de cocción	45
Figura 3.13 Comparación de temperaturas en la marmita entre COMSOL Multiphysics y Wolfram System Modeler	46
Figura 3.14 Comparación de temperaturas en el horno entre COMSOL Multiphysics y Wolfram System Modeler	47
Figura 5.1 Selección de asistente y dimensión de espacio del modelo	53
Figura 5.2 Selección de la física del modelo	54

Figura 5.3 Selección del estudio del modelo	54
Figura 5.4 Interfaz para la definición de los parámetros del modelo	55
Figura 5.5 Geometría de la marmita	56
Figura 5.6 Materiales utilizados en el modelo	56
Figura 5.7 Configuración del flujo laminar en el modelo	57
Figura 5.8 Configuración de transferencia de calor en fluidos en el modelo	57
Figura 5.9 Configuración de la malla en el modelo	58
Figura 5.10 Configuración del estudio en el modelo	58
Figura 5.11 Configuración de los puntos para tabulación de datos.....	59
Figura 5.12 Configuración del instante de tiempo para la visualización de temperaturas	59
Figura 5.13 Geometría del horno.....	60
Figura 5.14 Materiales utilizados en el modelo.....	60
Figura 5.15 Configuración del flujo laminar en el modelo	61
Figura 5.16 Configuración de transferencia de calor en fluidos en el modelo	61
Figura 5.17 Configuración de la malla en el modelo	62
Figura 5.18 Configuración del estudio en el modelo	62
Figura 5.19 Configuración de los puntos para tabulación de datos.....	63
Figura 5.20 Configuración del instante de tiempo para la visualización de temperaturas	64
Figura 5.21 Configuración de las condiciones ambientales	64
Figura 5.22 Configuración de las condiciones de control del nivel de la caldera.....	65
Figura 5.23 Configuración de las condiciones de control del quemador de la caldera	66
Figura 5.24 Configuración de las propiedades de la caldera	66
Figura 5.25 Configuración de las propiedades de la válvula.....	67
Figura 5.26 Modelo de la marmita.....	67
Figura 5.27 Configuración de las propiedades del Volume.....	68
Figura 5.28 Configuración de las propiedades del Pipe.....	68
Figura 5.29 Configuración de las propiedades de las funciones Convection y Prescribed Temperature	69
Figura 5.30 Configuración del tiempo de simulación	69
Figura 5.31 Selección de gráficos	70
Figura 5.32 Configuración de las condiciones de control del quemador de la caldera	71
Figura 5.33 Configuración de las propiedades de la válvula.....	71
Figura 5.34 Modelo del horno.....	72
Figura 5.35 Configuración de las propiedades del Volume.....	72

Figura 5.36 Configuración de las propiedades del Pipe.....	73
Figura 5.37 Configuración de las propiedades de las funciones Convection y Prescribed Temperature	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación de programas de modelado y simulación	18
Tabla 2.1 Propiedades termofísicas de los materiales	22
Tabla 2.2 Propiedades termofísicas del vapor	22
Tabla 2.3 Propiedades de la marmita.....	23
Tabla 2.4 Propiedades del horno	24
Tabla 2.5 Propiedades de la caldera.....	25
Tabla 2.6 Condiciones iniciales de los modelos	26
Tabla 3.1 Resultados obtenidos de temperaturas para la marmita	38
Tabla 3.2 Resultados obtenidos de temperaturas para el horno	39

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular desarrolla el modelado y simulación de un sistema de vapor contenido en una planta de alimentos, abarcando sus componentes, funcionamiento y aplicaciones; de tal manera que se asegure el desarrollo de este basado en conocimientos sólidos de los sistemas de vapor adquiridos durante este periodo. Para lo cual se modela y simula los principales equipos de consumo en COMSOL Multiphysics como software de apoyo, puesto que, permite conocer el comportamiento de los equipos en función del tiempo. Finalmente, los resultados obtenidos se importan en el software Wolfram System Modeler para conocer el comportamiento del sistema de vapor, estos datos se validan de acuerdo con datos obtenidos de equipos en funcionamiento detallados en documentos realizados anteriormente. Para desempeñar los objetivos establecidos el trabajo cuenta con tres capítulos estructurados de la siguiente manera:

En el primer capítulo se establece la introducción, objetivos y el marco teórico correspondiente a los sistemas de vapor y el software en que se realiza el modelo.

En el segundo capítulo se establecen condiciones, consideraciones, parámetros, limitaciones y demás características correspondientes al modelado y simulación de los equipos de consumo y el sistema de vapor.

En el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos de los cuales se realiza un análisis y validación; finalmente, se establecen conclusiones y recomendaciones.

PALABRAS CLAVE: Sistemas de vapor, Transferencia de calor, Simulación, Wolfram System Modeler, COMSOL Multiphysics.

ABSTRACT

The present work of curricular integration develops the modeling and simulation of a steam system contained in a food plant, covering its components, operation and applications, to ensure the development of this based on solid knowledge of steam systems acquired during this period. For which the main consumption equipment is modeled and simulated in COMSOL Multiphysics as support software, since it allows to know the behavior of the equipment as a function of time. Finally, the results obtained are imported into the Wolfram System Modeler software to know the behavior of the steam system, these data are validated according to data obtained from operating equipment detailed in previous papers. To achieve the established objectives, the work has three chapters structured as follows:

In the first chapter the introduction, objectives and the theoretical framework corresponding to steam systems and the software in which the model is performed are established.

The second chapter establishes conditions, considerations, parameters, limitations and other characteristics corresponding to the modeling and simulation of the consumption equipment and the steam system.

The third chapter shows the results obtained, which are analyzed and validated; finally, conclusions and recommendations are established.

KEYWORDS: Steam Systems, Heat Transfer, Simulation, Wolfram System Modeler, COMSOL Multiphysics.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El vapor tiene propiedades únicas de transferencia de calor, puesto que, puede transmitirlo de manera eficiente. Por lo que se utilizan los sistemas de vapor por los cuales se puede generar, distribuir y controlar la aplicación de vapor en los diferentes procedimientos industriales [1]. Para el caso particular de la producción alimenticia se usan para cocción, ahumado, curado y secado de alimentos.

Mediante el análisis del sistema de vapor en estado transitorio se busca entender el comportamiento durante las condiciones variables, que usualmente suceden durante el encendido, parada, variaciones de carga de manera imprevista, entre otros. Al estudiar todas estas variaciones de temperatura, presión, caudal, etc.; se puede anticipar y solucionar posibles inconvenientes que puedan suceder durante dichas etapas, además, mejorar la eficiencia del sistema.

Las simulaciones de los sistemas mediante un software permiten obtener resultados minuciosos y precisos, por lo que, es importante implementar una de estas tecnologías en la investigación en curso. Para este caso particular se realiza la aplicación de Wolfram SystemModeler, software en que se pueden definir escenarios que pueden ser representados mediante gráficos, diagramas, entre otros; para su posterior análisis.

Por lo tanto, es importante desarrollar modelos que mediante simulaciones se puedan cambiar sus parámetros. Con el objetivo de proporcionar una herramienta valiosa para la mejora continua de los procedimientos en las industrias.

1.1 Objetivo general

Modelar y simular un sistema de generación de vapor de una planta de alimentos con análisis en estado transitorio.

1.2 Objetivos específicos

- 1 Realizar un análisis bibliográfico sobre los sistemas de vapor para una planta de alimentos.
- 2 Establecer las condiciones bajo las que el sistema se considera en estado transitorio.
- 3 Detallar las principales características y funciones del software Wolfram SystemModeler.

- 4 Modelar y simular el sistema de vapor en estado transitorio mediante el software seleccionado.
- 5 Validar los resultados alcanzados de acuerdo con la metodología correspondiente a un estado transitorio.

1.3 Alcance

El presente Trabajo de Integración Curricular empieza con el análisis de los sistemas de vapor, en el cual se identifican los principales componentes, condiciones y criterios, necesarios para el funcionamiento en una industria de alimentos. Posteriormente, se modela y simula el sistema elegido mediante el software Wolfram System Modeler, donde se ajusta la disposición de elementos y criterios. Finalmente, se busca validar los datos obtenidos en la simulación con los de la metodología escogida.

1.4 Marco teórico

Los sistemas de vapor constituyen una fracción importante de los sistemas industriales, puesto que, de acuerdo con la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA por sus siglas en inglés). El consumo de vapor de acuerdo con cada sector industrial en dicho país es: papel y derivados con 35.3%, químicos y derivados con 22.9%, petróleo y carbón con 12.2% y alimentos y derivados con 11.1% [2].

Debido a su versatilidad para adaptarse a diversas aplicaciones industriales y eficiencia en la transferencia de energía térmica, estos son utilizados para: calefacción, generación eléctrica, sistemas de refrigeración, industria de alimentos, sector petrolero y demás procedimientos industriales.

1.4.1 Sistemas de vapor

Los sistemas de vapor se caracterizan por transformar la energía química emitida por un combustible en energía térmica, transmitiendo al fluido de trabajo, lo que permite elevar su temperatura para así formar el vapor, producto que posteriormente se suministra hacia las máquinas que lo demandan [3]. Como se observa en la Figura 1.1 estos sistemas están compuestos por tres subsistemas: generación, distribución y uso de vapor; todos estos trabajan conjuntamente para satisfacer las necesidades de los procedimientos industriales requeridos [4].

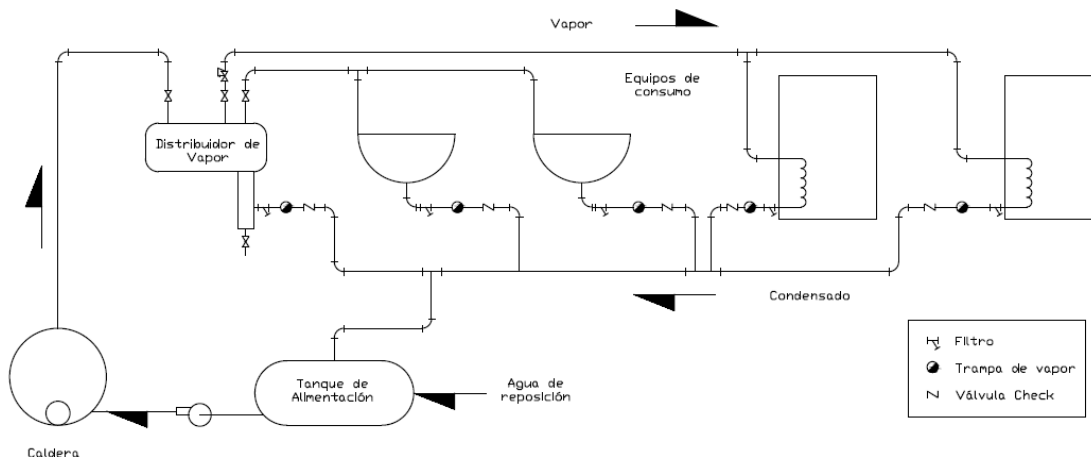


Figura 1.1 Sistema de vapor

Fuente: (Adaptado de: [4])

Debido a que la investigación no se centra en los sistemas de vapor, no se realiza una explicación exhaustiva de los componentes, aplicaciones y demás características; sin embargo, a continuación, se detalla mediante una explicación rápida los tres subsistemas que lo comprenden:

- **Generación de vapor**

La generación de vapor está compuesta de una unidad principal que es la caldera, medio en el cual el fluido cambia su estado a gaseoso, producto de la transformación de energía química en energía térmica en los quemadores. Las calderas pueden clasificarse de acuerdo con: capacidad de producción, tipo combustible, disposición de los fluidos, entre otros [5].

- **Distribución de vapor**

La distribución de vapor comprende la etapa de transferencia, que empieza desde la salida de la caldera hacia los puntos de uso en donde se lo requiera, para este subsistema se implementan: tuberías, válvulas, trampas de vapor, entre otros [4]. Las trampas cumplen un papel fundamental, puesto que, es el encargado de eliminar el condensado y limitar el paso al vapor que no ha cedido energía [6].

Por otra parte, en cuanto a tuberías, válvulas y demás accesorios, es crucial que se encuentren totalmente aislados, puesto que, esto previene las pérdidas del sistema además de accidentes relacionados con quemaduras [4].

- **Uso de vapor**

El subsistema final comprende el uso de vapor, producto que se aplica de acuerdo con requerimientos específicos de cada industria que incluye: generación de electricidad, calefacción, y demás procedimientos industriales de acuerdo con cada aplicación.

En el caso particular de una industria de alimentos el uso principal del recurso es para: esterilización, cocción, curado, secado y demás procesos de transformación de los alimentos [7].

1.4.1.1 Estado transitorio en los sistemas de vapor

El estado transitorio en los sistemas se define como las condiciones temporales dentro de este durante un periodo entre que inicia algún evento del sistema hasta que se alcanza su estabilidad, en particular en los sistemas de vapor se refiere a los sucesos como arranque, paradas, cambios en la carga y demanda de vapor, entre otros. Momentos en los cuales variables como presión, temperatura, caudal de vapor y demás, experimentan cambios que causan fluctuaciones en las condiciones normales de operación de los sistemas [8].

1.4.2 Sistemas de vapor en la industria de alimentos

En una industria de alimentos es necesario que los procesos de producción se realicen de forma eficiente y precisa para garantizar la calidad de los productos; por lo tanto, mediante los sistemas de vapor se ofrecen soluciones de forma versátil y efectiva para todos los procedimientos que se realicen.

La amplia cantidad de operaciones que se realizan en dichas industrias es llevada a cabo con diferentes unidades de consumo de vapor donde se logran los productos requeridos, por lo tanto, a continuación, se realiza una explicación de algunos de los equipos utilizados en este tipo de establecimientos:

- **Hornos**

Dispositivos que funcionan mediante la introducción de vapor en la cámara, donde este circula en todo su interior permitiendo una cocción de los alimentos de forma eficiente y homogénea [9]. Existen varios tipos de disposiciones de acuerdo con: tipo de cocción, capacidad, tipo de combustible, entre otros.

- **Marmitas**

Se pueden identificar como recipientes totalmente aislados que cocinan grandes cantidades de alimentos de manera rápida y eficiente [10]. Contienen en su interior un

serpentín por donde transita el vapor y de esa manera se transfiere el calor hacia los alimentos que se encuentran dentro [7].

- **Autoclaves:**

Dispositivos utilizados con el objetivo de esterilizar utensilios, recipientes y demás elementos que lo requieran. Su funcionamiento consiste en la inyección de vapor en su interior, alcanzando temperaturas capaces de eliminar microorganismos, bacterias, entre otros [11].

- **Cámaras de mezcla:**

Recipientes donde se mezcla el vapor saturado con agua y por consiguiente existe transferencia de calor hacia el elemento frío, alcanzando requerimientos de temperatura y humedad necesarios de acuerdo con las aplicaciones solicitadas [7].

- **Evaporadores:**

Artefactos empleados para separar y eliminar el líquido contenido en los alimentos, provocando: preconcentración de líquidos, reducción de volumen de líquido, reducción de la actividad de agua, entre otros [12].

1.4.3 Eficiencia en los sistemas de vapor

En los sistemas de vapor es importante hablar de eficiencia durante el diseño y funcionamiento, puesto que, es necesario eliminar o simplificar dentro de lo posible las pérdidas durante sus tres etapas: generación, distribución y uso. El constante desarrollo de la tecnología ha permitido avances significativos en la eficiencia y gestión de los sistemas, destacando su función esencial en las aplicaciones industriales.

El sistema de distribución es clave para garantizar la eficiencia en un sistema de vapor, puesto que, es necesario que el vapor consiga en su punto de consumo la mejor calidad y de acuerdo con los requerimientos solicitados. Por consiguiente, es importante la continua verificación y monitoreo del correcto funcionamiento, así como la identificación de oportunidades de mejora, ya que esto significará un ahorro energético para todo el sistema [5].

Adicionalmente, existen otros factores que se deben controlar para mantener o mejorar la eficiencia de los sistemas de vapor:

- **Mejoramiento del sistema de control**

Los sistemas de control permiten monitorear variables como: temperatura, oxígeno, CO, entre otros. Por consiguiente, se puede mejorar la mezcla de aire combustible lo que ocasiona una mejor eficiencia y, además, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [2].

- **Reducción de los gases de combustión**

El exceso de gases de combustión es producido por fugas tanto en la caldera como en el ducto de escape de humo, ocasionando la reducción de transferencia de calor hacia el vapor y generando mayores requerimientos de bombeo [2].

- **Reducción del exceso de aire**

Existe una relación directa entre el uso de aire y el desperdicio de calor para calentar el aire, por lo que, es importante mantener hasta un 15% exceso durante la relación de combustión [2].

- **Mejoramiento del sistema de aislamiento**

Es sistema de aislamiento permite reducir la pérdidas de calor hacia los demás componentes del sistema y el entorno; por lo que, es importante implementar materiales que tengan menor capacidad calorífica [2].

1.4.4 Modelado y simulación de los sistemas de vapor

El modelado y simulación representa un papel clave en la optimización de los sistemas industriales y en nuestro caso particular en los sistemas de vapor para una industria de alimentos. Puesto que, mediante simulaciones es posible identificar posibles perfeccionamientos a los sistemas en temas relacionados con la eficiencia, emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros. En este contexto, mediante la investigación se busca mejorar los sistemas de vapor identificando sus posibles problemas y generando soluciones innovadoras a estos.

La selección del software Wolfram SystemModeler como herramienta principal para el modelado y simulación del sistema para el desarrollo del proyecto se fundamenta en la licencia con la que cuenta la universidad, puesto que, esto garantiza el cumplimiento de todos los componentes y herramientas contenidas que son necesarias en la elaboración de este documento.

1.4.4.1 Wolfram System Modeler

El software es un medio gráfico interactivo diseñado para la modelación y simulación de los sistemas mediante un lenguaje conocido como Modelica, lenguaje declarativo de alto nivel que permite modelar la mayoría de los campos en la ingeniería. Por otra parte, este se basa en la representación de los modelos mediante ecuaciones diferenciales, por lo que es más sencillo realizar aplicaciones numéricas de alto nivel sin la necesidad de implementar métodos numéricos, post-procesamiento, entre otros [13]. Las principales ventajas del sistema son:

- Se crea modelos de forma rápida e intuitiva al arrastrar los elementos que se visualizan fácilmente, lo que genera facilidad de aprendizaje en los usuarios nuevos [14],
- Es posible combinar varios dominios y comparar su comportamiento en diferentes condiciones de funcionamiento [14],
- Permite la implementación de los sistemas modelados en el mundo real mediante el uso de Arduino, por lo que, es posible crear de forma rápida nuevos prototipos [14], entre otros.

1.4.4.2 Ventajas del software frente a sus competidores

El sistema Wolfram System Modeler se caracteriza por ser el más completo en el modelado y simulación, por lo que, en la Tabla 1.1 se representa cada una de sus superioridades con respecto a otros programas.

Tabla 1.1 Comparación de programas de modelado y simulación

Programa	Wolfram System Modeler	MapleSim	Simulink
Modelado			
Modelado de varios dominios	Accesible	Accesible	Accesible con costo adicional
Elaboración de modelos mediante la técnica de arrastre	Accesible	Accesible	Accesible
Generación automática de la documentación del modelo	Accesible	-	-

Simulación			
Simulación en tiempo real	Accesible	No dispone	Accesible con costo adicional
Visualización			
Interfaz interactiva	Accesible	-	Accesible
Lenguaje gráfico 2D y 3D	Accesible	No dispone	No dispone

Fuente: (Adaptado de: [15])

El programa consta de librerías capaces de cubrir varios campos de ingeniería de acuerdo con las necesidades del usuario, cada una se caracteriza por proporcionar modelos y elementos acorde con su especialidad, el sistema cuenta con librerías como: Electrical, Magnetic, Mechanics, Fluid, Thermal, entre otros; cada uno con diferentes características.

1.4.4.3 Librería Fluid

El proyecto se efectúa con la implementación de la biblioteca Fluid, puesto que es un paquete gratuito del lenguaje Modelica que permite desarrollar componentes necesarios para el modelamiento de termofluidos en tuberías, vessels, válvulas y demás accesorios contenidos en esta [16]. Las principales prestaciones de la librería son:

- Simular y regular el flujo de los fluidos en los sistemas,
- Modelamiento de tanques y demás dispositivos de almacenamiento de fluidos,
- Definición de condiciones iniciales y eventos específicos con el comportamiento de un determinado sistema,
- Representación de modelos termodinámicos como se observa en la Figura 1.2, hidráulicos, entre otros.

La versatilidad del sistema al poder incorporar diferentes elementos correspondientes a otras librerías permite desarrollar modelos multidisciplinarios capaces de abarcar conjuntos complejos entre diferentes áreas de la ingeniería [17].

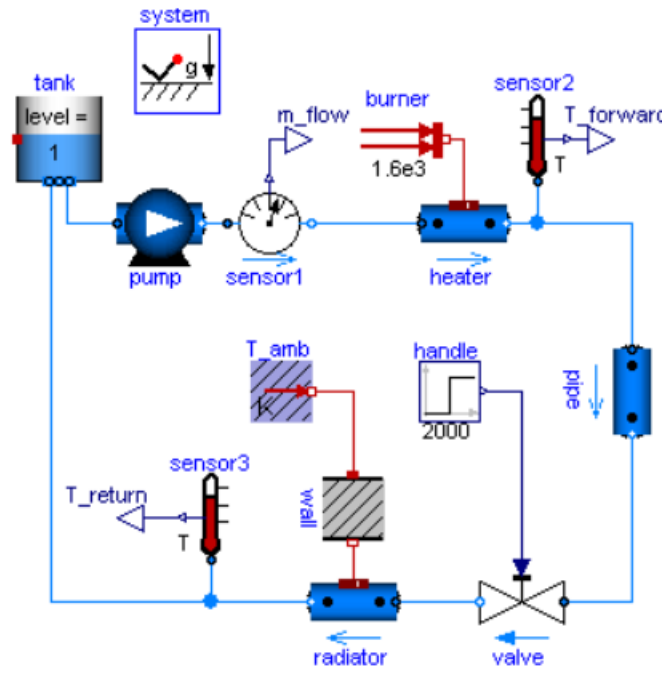


Figura 1.2 Sistema de calefacción realizado con la librería Fluid

Fuente: (Obtenido de: [16])

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se realizará el modelado y simulación de un sistema de vapor para una planta de alimentos, esto incluye los principales consumidores de vapor como marmita y horno. El análisis de este se centra en el estado transitorio o más específicamente un estado pseudo-transitorio debido a las limitaciones que tiene el software principal. Además, se implementa el software COMSOL Multiphysics como apoyo para el modelado y simulación de los equipos de consumo, ya que en el software Wolfram System Modeler no es posible analizar durante un estado transitorio. Finalmente, se integra los datos obtenidos en el software auxiliar con el principal para el debido análisis del sistema de vapor.

A continuación, se incluye un diagrama de flujo como se observa en la Figura 2.1, donde se detalla cada uno de los pasos a seguir desde el modelado y simulación de los equipos; hasta la integración de los resultados en el sistema de vapor para su posterior interpretación.

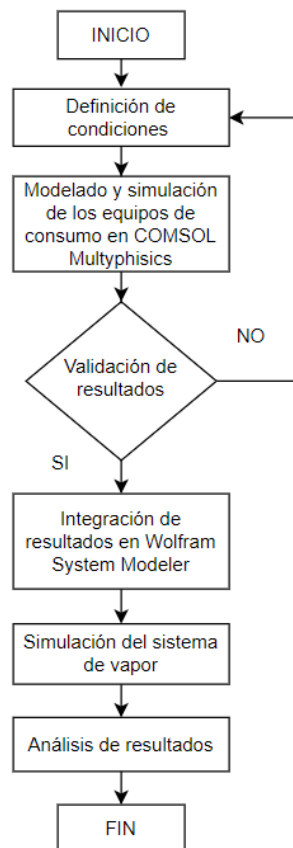


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología implementada

Fuente: (Propia)

Es importante que previo a la modelación se realicen las limitaciones correspondientes del sistema definiendo propiedades, dimensiones, condiciones iniciales y consideraciones durante las simulaciones.

2.1 Propiedades termofísicas

Los materiales que se utilizaron durante la simulación de los dos equipos de consumo son agua, aire, vapor, acero AISI 316 y jamón. De las cuales las del agua, aire y el acero se definen automáticamente de acuerdo con la librería del software; sin embargo, se detallan las propiedades en la Tabla 2.1 a continuación.

Tabla 2.1 Propiedades termofísicas de los materiales

Propiedades	Agua	Aire	AISI 316	Jamón
Densidad (kg/m ³)	997	1.204	8000	1030
Conductividad térmica (W/m - °C)	0.598	0.0257	16.2	0.480
Difusividad térmica (m ² /s)	1.43 x 10 ⁻⁷	2.22 x 10 ⁻⁵	3.93 x 10 ⁻⁶	0.14 x 10 ⁻⁶
Calor específico (kJ/kg – K)	4.180	1.005	0.500	3.480

Fuente: (Obtenido de [18])

En la caldera se consideraron las propiedades del vapor como se muestra en la Tabla 2.2 de acuerdo con Fluid Property Calculator, una página web que es una herramienta donde se pueden obtener las propiedades de los fluidos bajo ciertas condiciones iniciales [19]. Para este caso en particular se considera una temperatura de 168.5 °C y una presión de 100 psig.

Tabla 2.2 Propiedades termofísicas del vapor

Propiedades	Valor
Entalpía del vapor saturado	712.69 (kJ/kg)
Entalpía específica del líquido	67.90 (kJ/kg)
Densidad en fase de vapor	0.899 (g/cm ³)
Densidad en fase líquida	0.9993 (g/cm ³)
Entalpía del vapor	2737 (kJ/kg)

Fuente: (Obtenido de [19])

2.2 Características de los elementos

Las características necesarias para los modelos se basaron de acuerdo con documentos realizados previamente donde se incluyen equipos de consumo como horno y marmita; además, de elementos principales que componen una planta de vapor en una industria de alimentos.

2.2.1 Marmita

En la marmita se consideraron dimensiones, materiales, capacidad y demás como se puede observar en la Figura 5.5; de acuerdo con la ficha técnica de un proveedor de estos equipos [20]. Además, en la Tabla 2.3 se incluyen las principales características utilizadas en el modelo.

Tabla 2.3 Propiedades de la marmita

Propiedades	Valor
Capacidad	0.5 (m ³)
Dimensiones de la cuba	1060x600 (mm)
Material	AISI 316
Longitud del serpentín	12.4 (m)
Diámetro del serpentín	34 (mm)

Fuente: (Obtenido de [20])

La cantidad de jamón que debe ser incluido se basa en una relación de volumen de 2:1 del fluido con respecto al alimento a cocinarse [7]. Por lo tanto, se determina que el volumen total de jamón es de 0.167 m³ y con la densidad se define una masa total de 172 kg.

De acuerdo con un fabricante de embutidos el diámetro de una pieza de jamón es de aproximadamente 134 mm [21]. Por lo tanto, con el diámetro y las dimensiones de la marmita se determinan un aproximado de 14 piezas de jamón que se cocinan por ciclo.

2.2.2 Horno

En el horno se consideraron características de acuerdo con el fabricante VEMAG, una empresa productora de hornos para el procesamiento de alimentos mediante vapor como se observa en la Figura 2.2 [22]. En la Tabla 2.4 se incluyen las principales características utilizadas en el modelo.

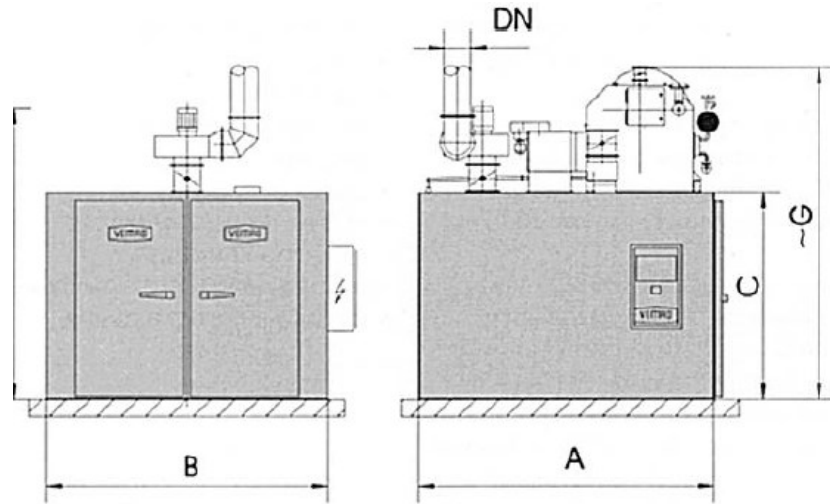


Figura 2.2 Diagrama del horno Aeromat VEMAG

Fuente: (Obtenido de:[22])

Tabla 2.4 Propiedades del horno

Propiedades	Valor
Capacidad	11.36 (m ³)
Ancho	1920 (mm)
Alto	2452 (mm)
Profundidad	2413 (mm)
Longitud del serpentín	5 (m)
Diámetro del serpentín	50.8 (mm)

Fuente: (Obtenido de [22])

En el horno se mantiene una relación de volumen de 4:1 entre el fluido y los alimentos [7], por lo tanto, el volumen total del jamón es 2.27 m³ y con la densidad se define una masa total de 2338.1 kg. Con las dimensiones del embutido se determina un aproximado de 66 piezas de jamón que se cocinan por ciclo.

2.2.3 Caldera

La caldera considerada se selecciona de un documento realizado sobre un sistema de vapor para una planta de alimentos [7], del fabricante CLEAVER BROOKS como se observa en la Figura 2.3, con disposición pirotubular y cuenta con las características detalladas en la Tabla 2.5.

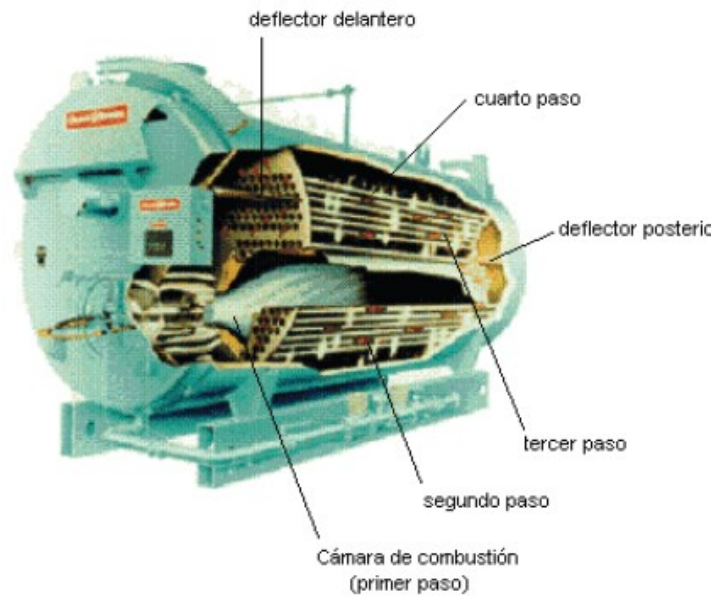


Figura 2.3 Caldera pirotubular CLEAVER BROOKS

Fuente: (Obtenido de: [7])

Tabla 2.5 Propiedades de la caldera

Propiedades	Valor
Condiciones de operación	100 (psig)
Largo	4500 (mm)
Diámetro	1620 (mm)
Espesor pared	52 (mm)
Capacidad	9.28 (m ³)

Fuente: (Adaptado de [7])

2.3 Condiciones iniciales

En las simulaciones tanto de los consumidores de vapor como el sistema completo, es necesario establecer las condiciones iniciales, puesto que, estas son importantes para que los resultados obtenidos sean acordes con la realidad. Por lo tanto, una definición precisa de estas es un paso fundamental para el éxito del modelado y simulación.

En ambos software se necesita configurar sus condiciones iniciales para la resolución de las ecuaciones que los sistemas, estos escenarios se modifican de acuerdo con las suposiciones y datos obtenidos en modelos realizados previamente. Los parámetros que se deben codificar son:

- Temperaturas de los fluidos,
- Temperaturas de los materiales,
- Condiciones ambientales,
- Propiedades termofísicas, entre otros.

Las condiciones iniciales que se añadieron a los modelos tanto de consumidores de vapor como el sistema en general se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Condiciones iniciales de los modelos

Propiedades	Temperatura (°C)
Temperatura inicial del agua	16.0
Temperatura inicial jamón	11.8
Temperatura ambiente	20.0
Temperatura pared serpentín	100.0
Temperatura final del jamón	74.7

Fuente: (Obtenido de [7])

Estos datos se usan en ambos modelos respectivamente, considerando que se realizan de forma independiente, uno para la marmita y otro para el horno. Además, todos los datos se mantienen durante la simulación del sistema de vapor.

2.4 Modelado y simulación de los equipos de consumo usando COMSOL Multiphysics

Mediante COMSOL Multiphysics se puede realizar el simulaciones de modelos de transferencia de calor, mecánica de fluidos, mecánica estructural, entre otros [23]. Por lo que, para este caso se selecciona el software para analizar el comportamiento de la marmita y el horno en su estado transitorio debido a que el software Wolfram System Modeler solo lo realiza en estado estable.

Por lo tanto, se utiliza una licencia prueba de dos semanas otorgada por los desarrolladores del software, tiempo suficiente en que se modela y simula los elementos deseados.

2.4.1 Marmita

La marmita es un elemento fundamental en los sistemas de vapor para las industrias alimenticias, por lo que, se selecciona para su estudio de los fenómenos térmicos que ocurren en su interior. Previo al modelado y simulación es importante definir las consideraciones del modelo a realizar.

2.4.1.1 Consideraciones

Estas consideraciones incluyen la selección de parámetros temperatura, coeficiente de convección, consideración de pérdidas de energía, entre otros; que permitan una precisión y relevancia, además sea posible considerar variaciones para futuras mejoras en los modelos planteados. Las principales consideraciones son:

- Se asume que el modelo es simétrico, por lo tanto, una representación 2D es suficiente, además, se simplifica las ecuaciones y cálculos necesarios del sistema, disminuyendo el recurso computacional necesario.
- Se asume que la temperatura de la pared exterior de la tubería del serpentín es la misma del vapor que pasa a través de este, además, la temperatura del vapor se la considera como constante.
- No se consideran entre paredes de la cuba y carcasa de la marmita elementos de aislamiento, por lo que, solo se asume convección con el medio ambiente con un coeficiente de $10.7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [7].
- La distribución de las piezas de jamón se las realiza de forma uniforme en toda la superficie de control.
- Dentro de la marmita el fluido experimenta movimiento debido a las diferencias de temperatura por la transferencia de calor mediante convección natural.
- El tiempo de las simulaciones son variables, esto depende del alcance de las temperaturas objetivo, por lo tanto, la simulación se interrumpe en el momento en que se alcanzan estas, garantizando así la eficiencia de cálculo.

2.4.1.2 Entorno computacional

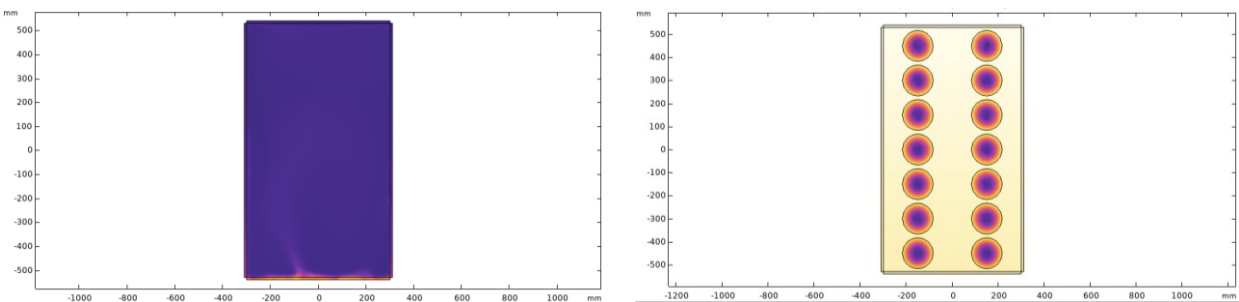
Para llevar a cabo las simulaciones, se utilizó una laptop con el sistema operativo Windows 11 Home. El dispositivo está equipado con un procesador Intel(R) Core i7-10750H CPU a 2.60 GHz con 6 núcleos y 12 hilos, ofreciendo un rendimiento eficiente para tareas de simulación. Además, cuenta con 16 GB de memoria RAM instalada, lo que proporciona suficiente capacidad para manejar aplicaciones y procesos intensivos en recursos. Este entorno de hardware, junto con el sistema operativo de 64 bits, asegura que las simulaciones se ejecuten de manera fluida y con tiempos de procesamiento aceptables, permitiendo obtener resultados precisos y fiables.

2.4.1.3 Modelado y simulación

Las distribuciones de temperaturas en función de la superficie en un instante de tiempo determinado se muestran en Figura 2.4 (a). Donde de acuerdo con lo configurado la entrada de calor se encuentra en la parte inferior de la superficie, que es el lugar donde está ubicado el serpentín y, por lo tanto, se transfiere el calor hacia todo el fluido. Esta etapa solo se muestra el fluido debido a que representa el precalentamiento de la marmita, por lo tanto, se busca obtener el tiempo hasta que se alcanza la temperatura deseada previo al ingreso de los alimentos en su interior.

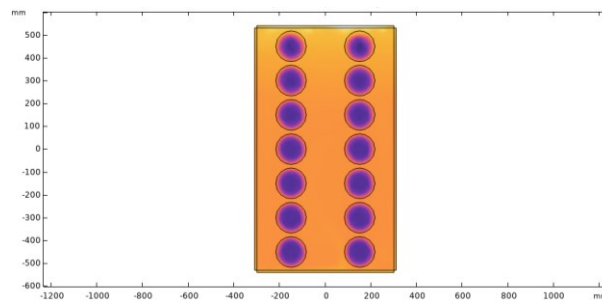
La distribución de temperaturas en la superficie una vez que se ingresaron las piezas de jamón en su interior se muestra en la Figura 2.4 (b), en este intervalo de tiempo se pretende obtener el tiempo en que disminuye su temperatura debido al intercambio de calor con los alimentos.

De forma similar a anterior se muestra la distribución de temperaturas en la superficie como se observa en Figura 2.4 (c), en este intervalo de tiempo se pretende obtener el tiempo en que aumenta su temperatura debido a la entrada de calor en la base y el intercambio de calor con los alimentos.



(a) Calentamiento $t = 8000$ s

(b) Disminución de temperatura $t = 2000$ s



(c) Aumento de temperatura $t = 1000$ s

Figura 2.4 Simulación de la distribución de temperaturas en una superficie de la marmita durante diferentes tiempos usando COMSOL Multiphysics

Fuente: (Propia)

2.4.2 Horno

El horno es un equipo ampliamente utilizado en la industria alimenticia debido a los diferentes procedimientos que se pueden realizar en su interior, por lo tanto, es otro equipo considerado para el modelado y análisis durante este trabajo. Previo al modelado y simulación es importante definir las consideraciones del modelo a realizar.

2.4.2.1 Consideraciones

Al igual que en la marmita estas consideraciones incluyen la selección de parámetros que permitan una precisión y relevancia en los resultados obtenidos. Además, permite en un futuro realizar variaciones que aumenten la calidad en el modelo. Las principales consideraciones son:

- Se asume que el modelo es simétrico, por lo tanto, una representación 2D es suficiente, además, se simplifica las ecuaciones y cálculos necesarios del sistema, disminuyendo el recurso computacional necesario.
- Se asume que la temperatura de la pared exterior de la tubería del serpentín es la misma del vapor que pasa a través de este, además, la temperatura del vapor se la considera como constante.
- No se consideran entre paredes interiores y carcasa del horno elementos de aislamiento, por lo que, solo se asume convección con el medio ambiente con un coeficiente de $10.7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [7].
- La distribución de las piezas de jamón se las realiza de forma uniforme en toda la superficie de control.
- Dentro del horno el fluido experimenta movimiento debido a las diferencias de temperatura por la transferencia de calor mediante convección natural.
- El tiempo de las simulaciones son variables, esto depende del alcance de las temperaturas objetivo, por lo tanto, la simulación se interrumpe en el momento en que se alcanzan estas, garantizando así la eficiencia de cálculo.

2.4.2.2 Entorno computacional

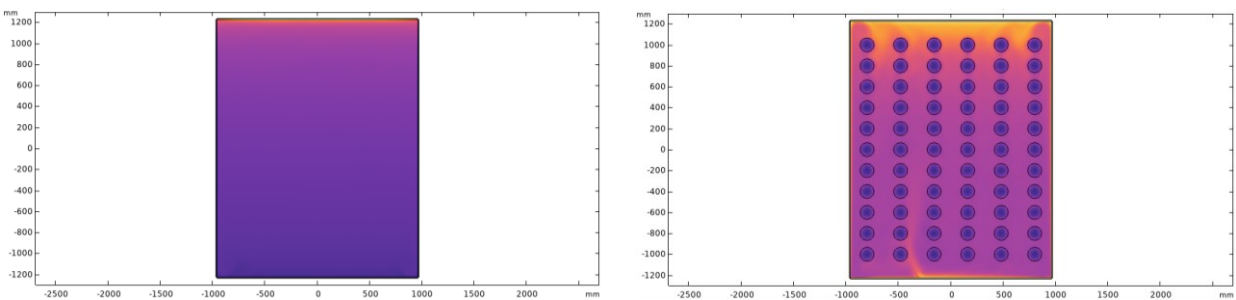
Para llevar a cabo las simulaciones, se utilizó una laptop con el sistema operativo Windows 11 Home. El dispositivo está equipado con un procesador Intel(R) Core i7-10750H CPU a 2.60 GHz con 6 núcleos y 12 hilos, ofreciendo un rendimiento eficiente para tareas de simulación. Además, cuenta con 16 GB de memoria RAM instalada, lo que proporciona suficiente capacidad para manejar aplicaciones y procesos intensivos en recursos. Este entorno de hardware, junto con el sistema operativo de 64 bits, asegura que las simulaciones se ejecuten de manera fluida y con tiempos de procesamiento aceptables, permitiendo obtener resultados precisos y fiables.

2.4.2.3 Modelado y simulación

Las distribuciones de temperaturas en función de la superficie en un instante de tiempo determinado como se muestra en la Figura 2.5 (a). Donde de acuerdo con lo configurado la entrada de calor se encuentra en la parte superior de la superficie, que es el lugar donde está ubicado el serpentín y, por lo tanto, se transfiere el calor hacia todo el fluido. Esta etapa solo se muestra el fluido debido a que representa el precalentamiento del horno, por lo tanto, se busca obtener el tiempo hasta que se alcanza la temperatura deseada previo al ingreso de los alimentos en su interior.

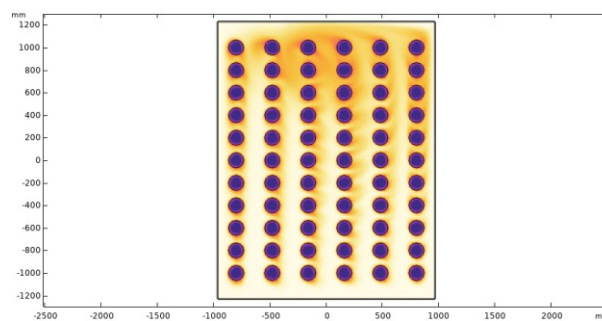
La distribución de temperaturas en la superficie una vez que se ingresaron las piezas de jamón en su interior se muestra en la Figura 2.5 (b), en este intervalo de tiempo se pretende obtener el tiempo en que disminuye su temperatura debido al intercambio de calor con los alimentos.

Finalmente, de forma similar a la figura anterior se muestra la distribución de temperaturas en la superficie en la Figura 2.5 (c), en este intervalo de tiempo se pretende obtener el tiempo en que aumenta su temperatura debido a la entrada de calor y el intercambio de calor con los alimentos.



(a) Calentamiento $t = 2500$ s

(b) Disminución de temperatura $t = 1000$ s



(c) Aumento de temperatura $t = 600$ s

Figura 2.5 Simulación de la distribución de temperaturas en una superficie del horno durante diferentes tiempos usando COMSOL Multiphysics

Fuente: (Propia)

2.5 Modelado y simulación del sistema de vapor usando Wolfram System Modeler

El uso de un software para la simulación de los sistemas de vapor se está incluyendo cada vez más en los ámbitos industriales e investigativos. Por lo que, al crear un modelo virtual permite al usuario modificar ciertas variables previo a una implementación, con el objetivo de encontrar o ajustar las condiciones adecuadas de funcionamiento de acuerdo con la aplicación deseada.

Mediante Wolfram System Modeler se puede realizar el estudio de los sistemas de vapor, donde se puede visualizar variables de presión, temperatura, volumen, entre otros; además, implementar un sistema de control [24]. En la Figura 2.6 se muestra el esquema del sistema de vapor que se va a realizar en el software.

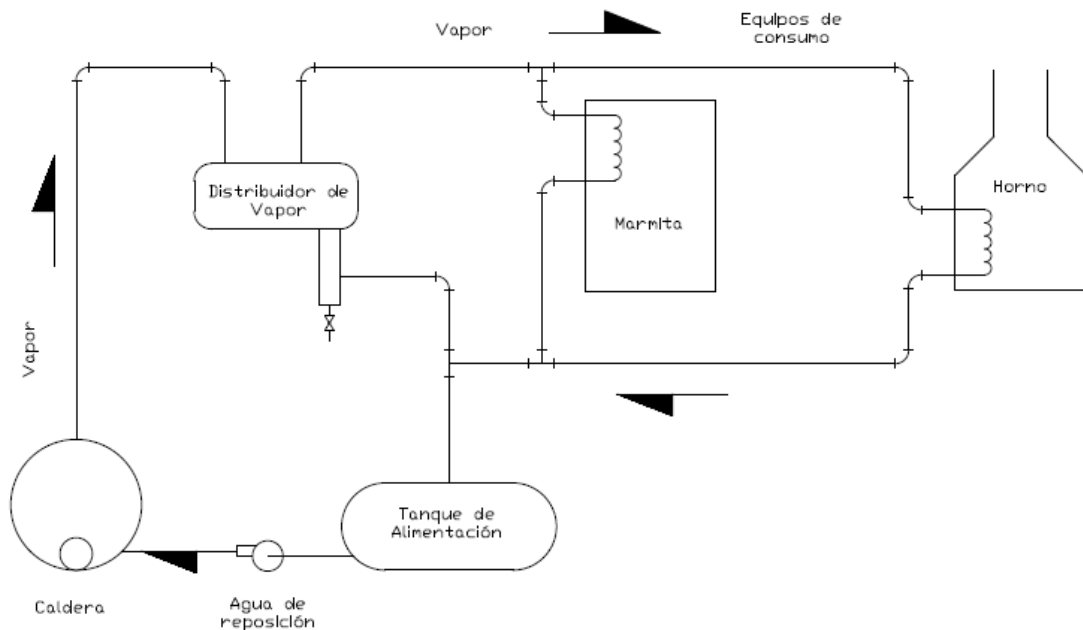


Figura 2.6 Esquema del sistema de vapor

Fuente: (Propia)

Antes de realizar la simulación es necesario definir las consideraciones, limitaciones y el proceso de integración de resultados entre los software utilizados durante este documento. Puesto que estas decisiones influyen en las condiciones del modelo, y esto permite establecer una guía para la interpretación de los resultados.

2.5.1 Consideraciones

Las consideraciones incluyen la selección de parámetros, pérdidas de energía, disposición, elementos, entre otros. Que permitan una precisión y relevancia en los resultados obtenidos, además sea posible considerar variaciones para futuras mejoras en los modelos planteados. Las principales consideraciones son:

- Se emplea un controlador Proporcional Integral PI para el control del nivel en el interior de la caldera, con un límite correspondiente al 70% de la capacidad máxima [25].
- Como medida de seguridad se utiliza un Limitador en la salida del controlador del nivel de la caldera, capaz de limitar las señales máximas a el caudal nominal de ingreso del agua en la entrada de la caldera equivalente a $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$ [7].
- No se contempla retorno de condensado, por lo tanto, la temperatura del agua de alimentación es constante igual a $16 \text{ }^\circ\text{C}$.
- No se contempla pérdidas de calor por las paredes de la caldera y de los equipos de consumo de vapor.
- No se utilizan los equipos de consumo de vapor de forma simultánea, se asume que se utilizan en diferentes horarios.

2.5.2 Limitaciones

En la simulación del sistema de vapor existen varias limitaciones, estas son necesarias definir las para hacer viable la simulación de los modelos y tener en cuenta en los resultados obtenidos con respecto al comportamiento real del sistema.

- Debido a que no es posible distribuir el vapor mediante los equipos de consumo, se realizan dos simulaciones una para cada uno respectivamente.
- No es posible definir una eficiencia de la caldera por lo tanto se la considera como ideal con una eficiencia del 100%.
- En los equipos de consumo no es posible definir un volumen con las mismas características que en la realidad, sin embargo, se considera lo más cercano posible, además, para las pérdidas de calor por los alimentos se han adaptado elementos disponibles en las librerías que nos permitan controlar dicho fenómeno.

2.5.3 Integración de resultados obtenidos con COMSOL Multiphysics

En esta sección se detalla el proceso de integración de los resultados obtenidos previamente en COMSOL Multiphysics llevados al sistema de vapor en Wolfram System Modeler, para lo cual es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Se exportan los datos de temperaturas con respecto del tiempo, tanto del fluido como de los alimentos dentro de los equipos de consumo.
2. Una vez obtenido las temperaturas de los puntos se llevan a una hoja de cálculo para realizar un promedio de todos y determinar los intervalos de precalentamiento, disminución y aumento de temperatura como se puede observar en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.
3. Posteriormente se añaden estos intervalos en forma de tabla a ciertos elementos del sistema de vapor, de tal manera que permitan controlar apertura y cierre de válvulas y quemador, además, de las pérdidas por convección y el arreglo que simula la temperatura de los alimentos.
4. Finalmente, se ejecuta la simulación y se comparan los resultados de temperaturas en los equipos de consumo obtenidos en ambos programas.

2.5.4 Modelado y Simulación

Se lleva a cabo dos simulaciones en Wolfram System Modeler que incluye como equipos de consumo una marmita y un horno, donde se tiene como objetivo analizar el sistema de vapor durante el estado transitorio. A continuación, se muestra cada uno de los modelos realizados.

2.5.4.1 Marmita

El modelo cuenta con una fuente de generación que es la caldera, el distribuidor de vapor que es la válvula y finalmente el equipo de consumo que es la marmita; cada uno con su respectivo sistema de control como se observa en la Figura 2.7.

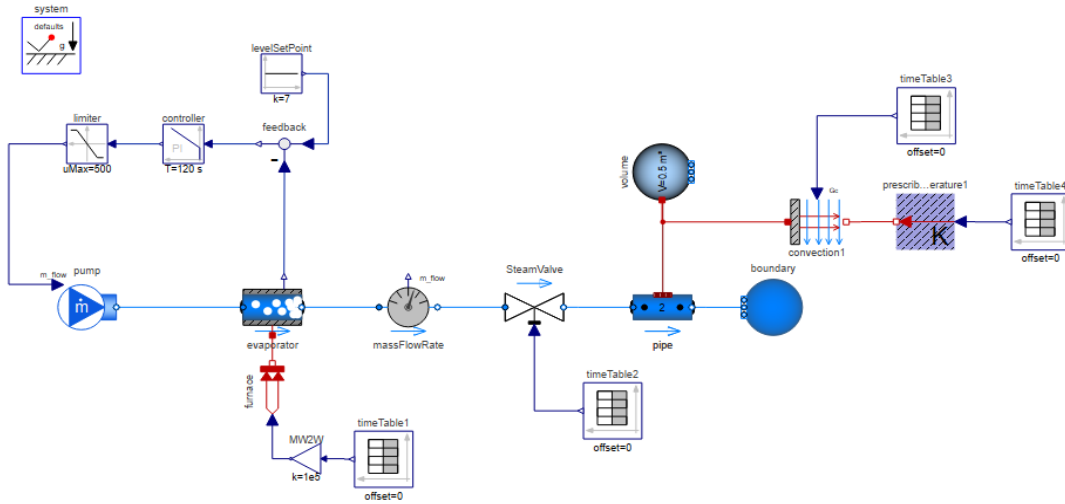


Figura 2.7 Sistema de vapor con la marmita como equipo de consumo

Fuente: (Propia)

El sistema completo de generación de vapor cuenta con un sistema de control del flujo másico de entrada en la caldera en función del nivel en su interior mediante un PI, además, un medidor de flujo másico a la salida de la caldera y un sistema de control de encendido y apagado del quemador en función de los intervalos de precalentamiento, aumento y disminución de temperatura en la marmita como se observa en la Figura 2.8.

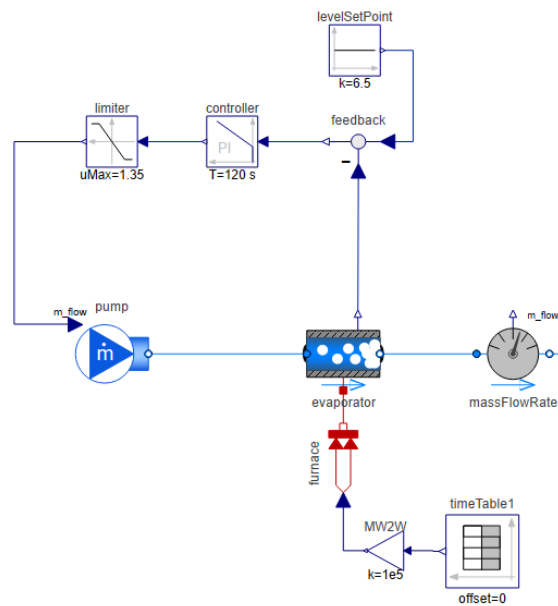


Figura 2.8 Sistema de generación de vapor

Fuente: (Propia)

Finalmente, la válvula como distribuidor de vapor que al igual que el quemador está controlada su apertura y cierre en función de los intervalos definidos previamente como se muestra en la Figura 2.9. En cuanto a la marmita, cuenta con: una tubería que representa el serpentín que se encuentra en su interior, un volumen que representa la cuba, un boundary que representa el tanque de almacenamiento de condensado y la función de convección y temperatura fija que representan las pérdidas de calor en su interior debido al intercambio con los alimentos.

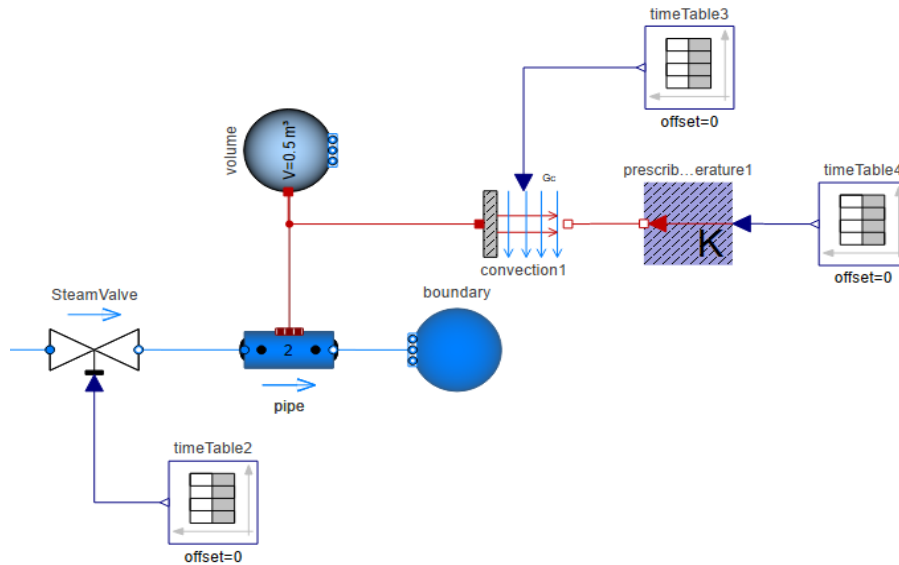


Figura 2.9 Marmita como equipo de consumo de vapor

Fuente: (Propia)

2.5.4.2 Horno

Al igual que la marmita como se observa en la Figura 2.10 el modelo cuenta con una fuente de generación que es la caldera, el distribuidor de vapor que es la válvula y finalmente el equipo de consumo que es la horno; cada uno con su respectivo sistema de control.

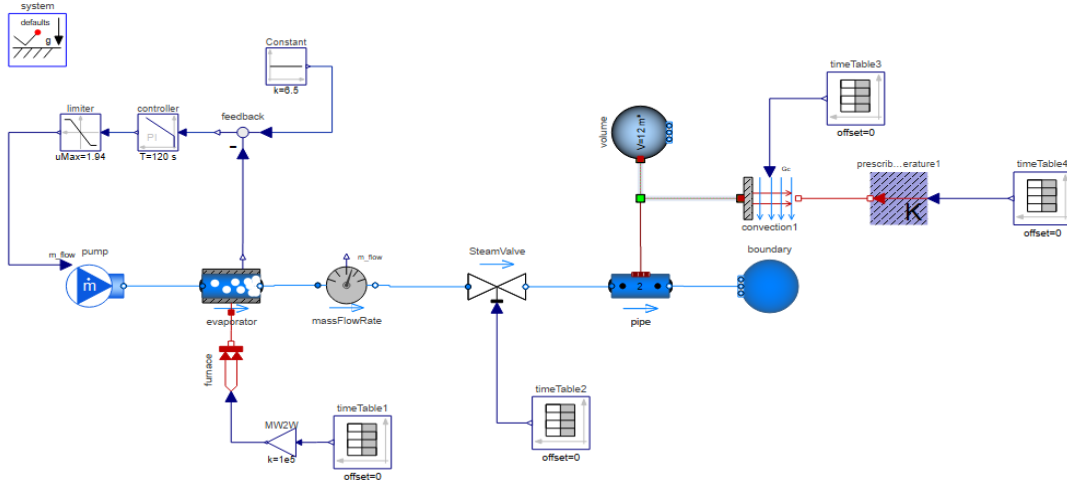


Figura 2.10 Sistema de vapor con el horno como equipo de consumo

Fuente: (Propia)

El sistema de generación, distribución son los mismos que en la marmita, la diferencia se encuentra en el equipo de consumo que como se observa en la Figura 2.11 se cuenta con diferentes condiciones además de los sistemas de control de la válvula, quemador y pérdidas que se configuran en función de los intervalos de precalentamiento, aumento y disminución de temperatura definidos previamente.

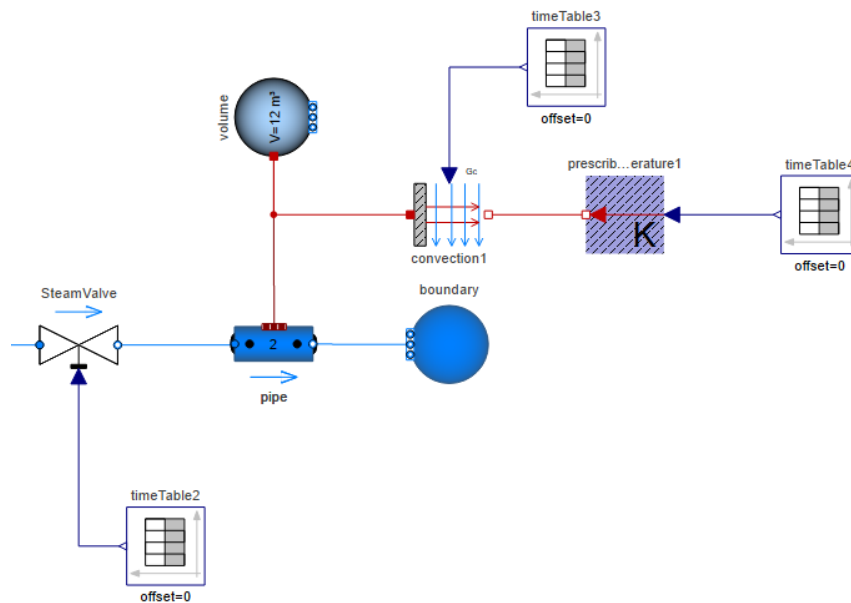


Figura 2.11 Horno como equipo de consumo de vapor

Fuente: (Propia)

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el modelado y simulación de los equipos de consumo en COMSOL Multiphysics además del sistema de vapor incluyendo estos equipos en Wolfram System Modeler, los resultados se centran en: las temperaturas obtenidas en el interior de los equipos, flujo másico de vapor generado y distribuido, control de la válvula de distribución y control del nivel del fluido en la caldera mediante el flujo másico de entrada.

3.1.1 Marmita mediante COMSOL Multiphysics

La variación de la temperatura en el interior de la marmita durante el precalentamiento y cocción de los alimentos se muestra en la Figura 3.2, para esto se obtuvo un promedio de tres puntos distribuidos uniformemente en la superficie como se observa en la Figura 3.1 los puntos rojos, donde las coordenadas de los puntos son $(0,0)$, $(0,400)$ y $(0,-400)$ asumiendo que el centro de coordenadas coincide con el centro de la geometría. Además, se eligieron varios puntos sobre los alimentos que son los puntos azules con coordenadas: $(-150,0)$, $(-150,450)$, $(-150,-450)$; para garantizar que se cumpla con la temperatura establecida. Finalmente, se obtuvieron los tiempos de aumento y disminución de temperatura en estado transitorio que serán añadidos en la simulación de la planta. En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de los tiempos y temperaturas obtenidos en cada intervalo.

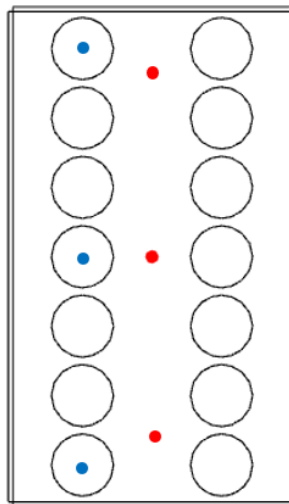


Figura 3.1 Geometría de la marmita con los puntos para la medición de temperaturas

Fuente: (Propia)

Tabla 3.1 Resultados obtenidos de temperaturas para la marmita

Acción	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Temperatura jamón (°C)
Calentamiento agua	7815	87.80	11.80
Disminución 1	2273	83.60	30.06
Aumento 1	1880	86.09	42.77
Disminución 2	2311	83.60	65.77
Aumento 2	2049	87.80	74.74

Fuente: (Propia)

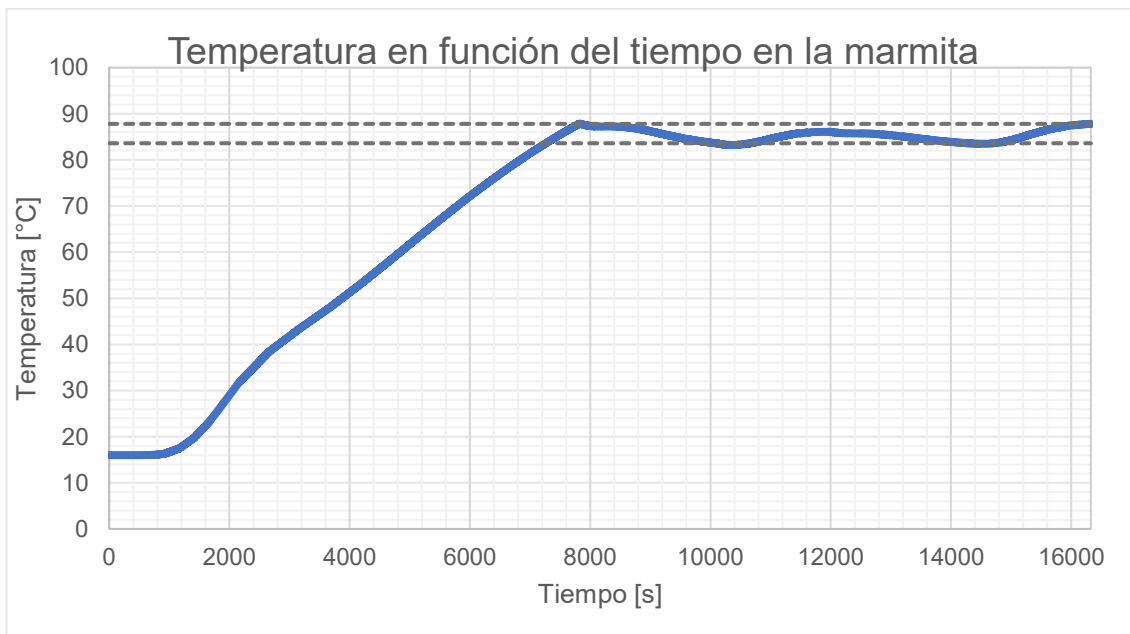


Figura 3.2 Variación de temperaturas en la marmita durante el calentamiento y cocción

Fuente: (Propia)

3.1.2 Horno mediante COMSOL Multiphysics

La variación de la temperatura en el interior del horno durante el precalentamiento y cocción de los alimentos se muestra en la Figura 3.4. Para esto se obtuvo un promedio de tres puntos distribuidos uniformemente en la superficie como se observa en la Figura 3.3 los puntos rojos, donde las coordenadas de los puntos son (0,0), (0,800) y (0,-800) asumiendo que el centro de coordenadas coincide con el centro de la geometría.

Además, se eligieron varios puntos sobre los alimentos que son los puntos azules con coordenadas: (-800,1005), (-800,0), (-800,-1005), (-160,1005), (-160,0), (-160,-1005), (800,1005), (800,0), (-800,-1005); para garantizar que se cumpla con la temperatura establecida. Estos datos al igual que los de la marmita serán añadidos en la simulación de la planta. En la Tabla 3.2 se muestra un resumen de los tiempos y temperaturas obtenidos en cada intervalo.

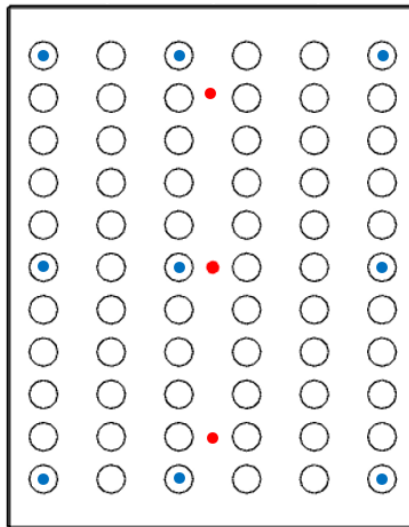


Figura 3.3 Geometría del horno con los puntos para la medición de temperaturas

Fuente: (Propia)

Tabla 3.2 Resultados obtenidos de temperaturas para el horno

Acción	Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Temperatura jamón [°C]
Calentamiento aire	3034	86.00	11.80
Disminución 1	369	80.00	20.32
Aumento 1	1185	86.00	29.69
Disminución 2	1367	80.00	37.75
Aumento 2	1033	86.00	46.52
Disminución 3	3539	80.60	57.24
Aumento 3	865	86.00	66.79
Disminución 4	2528	82.62	74.28

Fuente: (Propia)

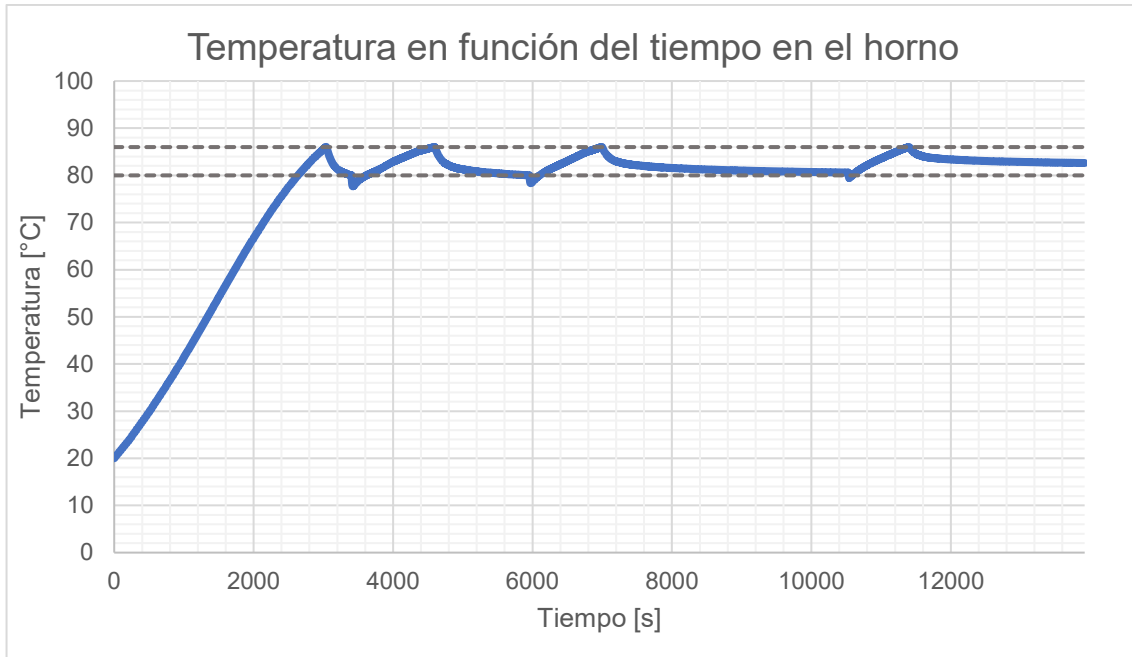


Figura 3.4 Variación de temperaturas en el horno durante el calentamiento y cocción

Fuente: (Propia)

3.1.3 Sistema de vapor con marmita mediante Wolfram System Modeler

La variación de temperaturas en la marmita durante las etapas que componen el ciclo de cocción en su interior se muestra en Figura 3.5, por otra parte, en la Figura 3.6 se muestra el flujo de vapor que entrega la caldera hacia el equipo de consumo que en este caso es la marmita, además, en la Figura 3.7 se muestra el control de apertura y cierre de la válvula durante todo el ciclo y finalmente, en la Figura 3.8 se muestra el control del volumen en el interior de la caldera durante todo el tiempo de análisis.

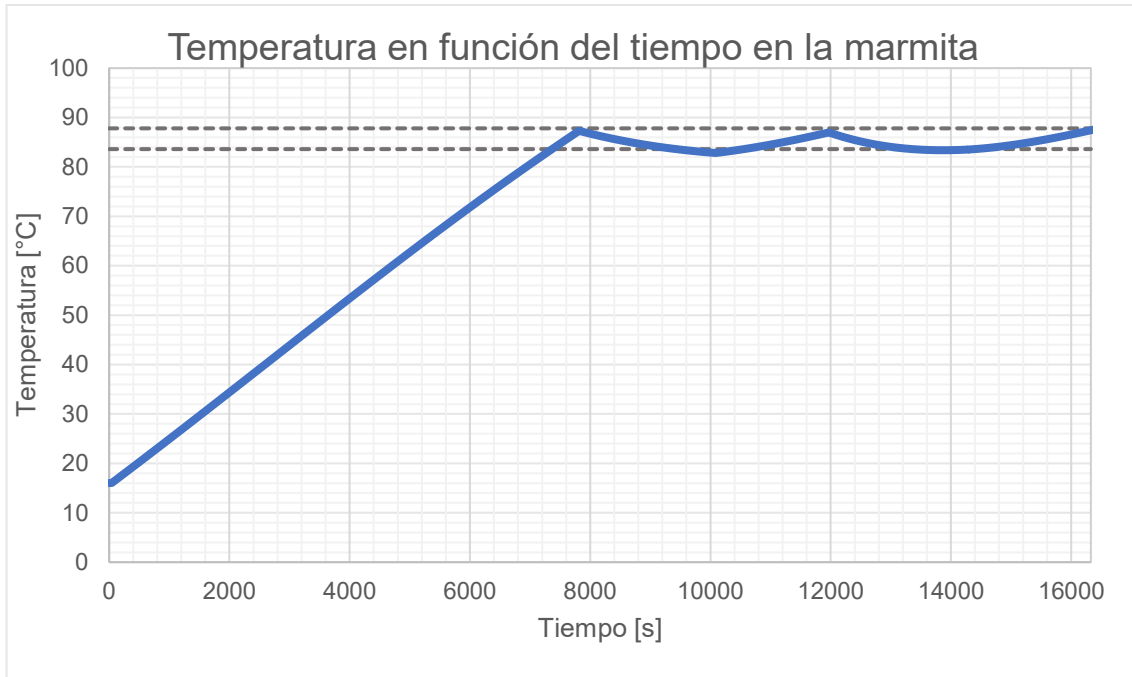


Figura 3.5 Variación de temperaturas en la marmita durante el ciclo de cocción

Fuente: (Propia)

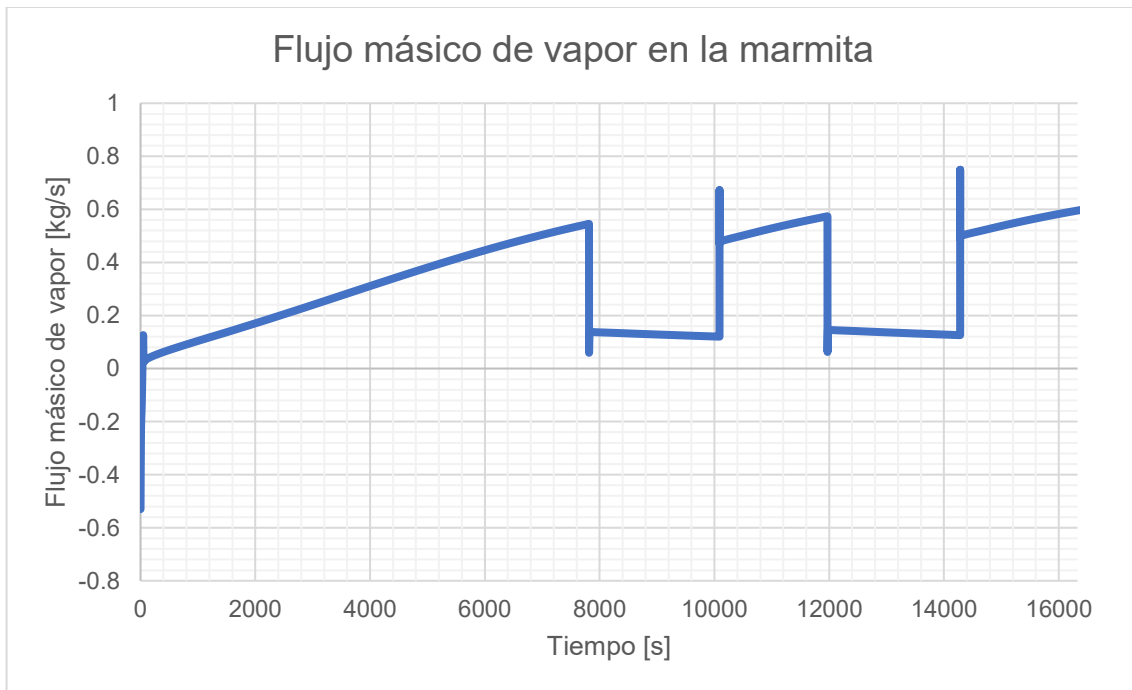


Figura 3.6 Flujo de vapor que entrega la caldera durante el ciclo de cocción

Fuente: (Propia)

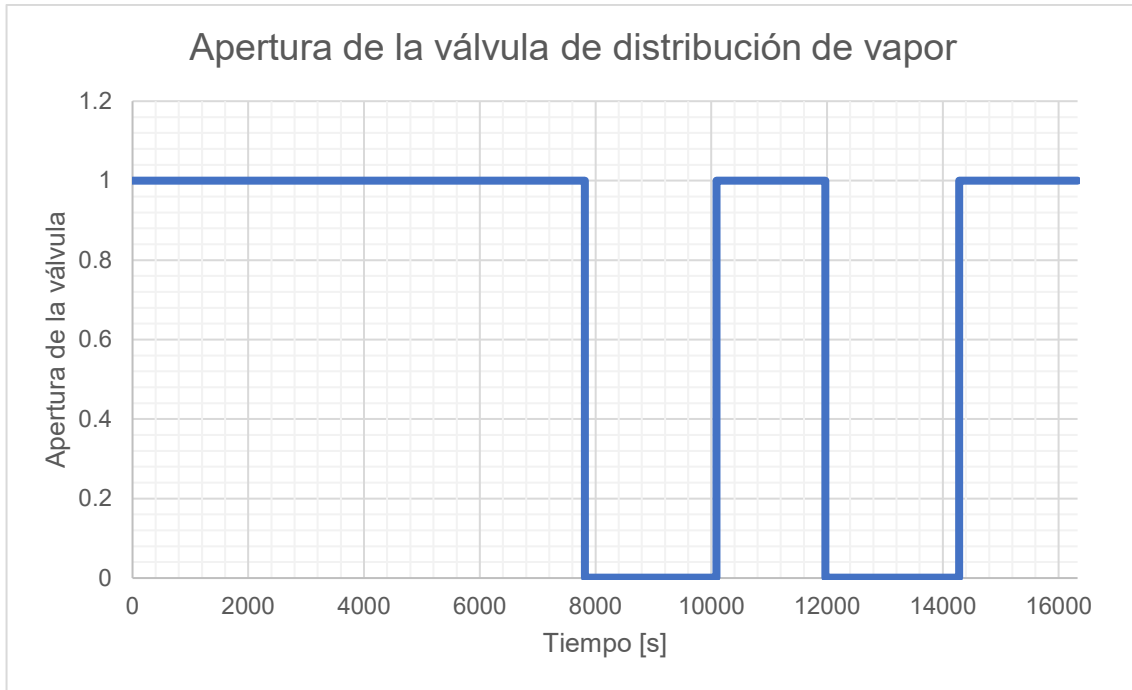


Figura 3.7 Apertura y cierre de la válvula principal durante el ciclo de cocción
Fuente: (Propia)

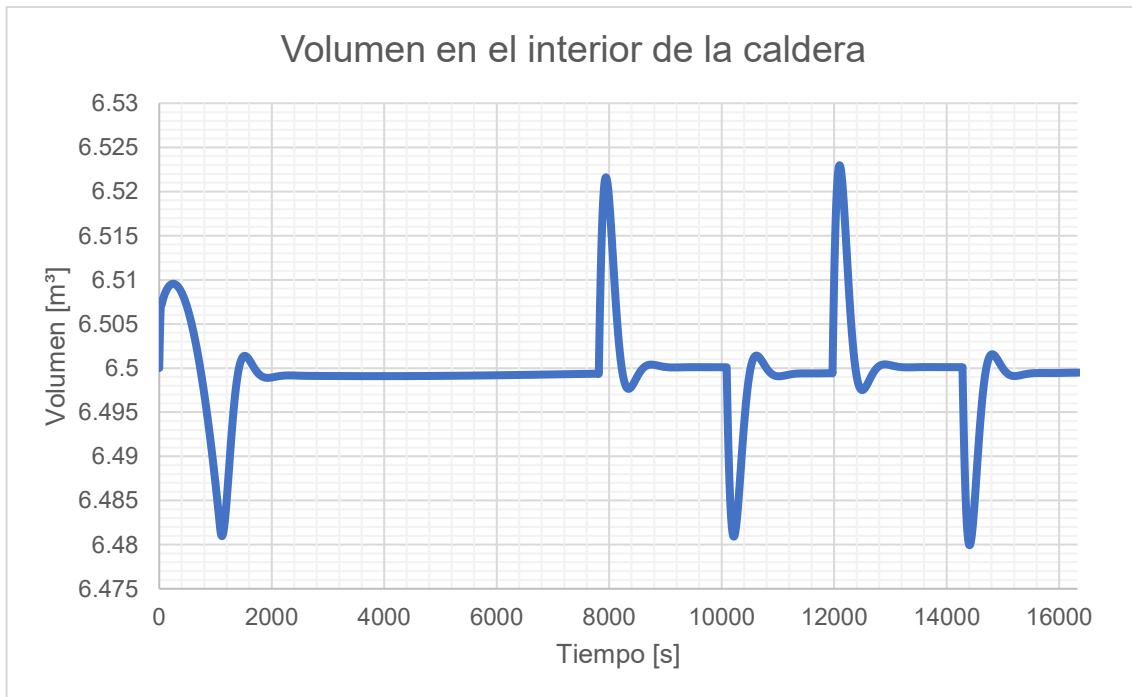


Figura 3.8 Volumen en el interior de la caldera durante el ciclo de cocción en la marmita
Fuente: (Propia)

3.1.4 Sistema de vapor con horno mediante Wolfram System Modeler

La variación de temperaturas en el horno durante las etapas que componen el ciclo de cocción en su interior se muestra en la Figura 3.9. Por otra parte, en la Figura 3.10 se muestra el flujo de vapor que entrega la caldera hacia el equipo de consumo que en este caso es el horno, además, en la Figura 3.11 se muestra el control de apertura y cierre de la válvula durante todo el ciclo y finalmente, en la Figura 3.12 se muestra el control del volumen en el interior de la caldera durante todo el tiempo de análisis.

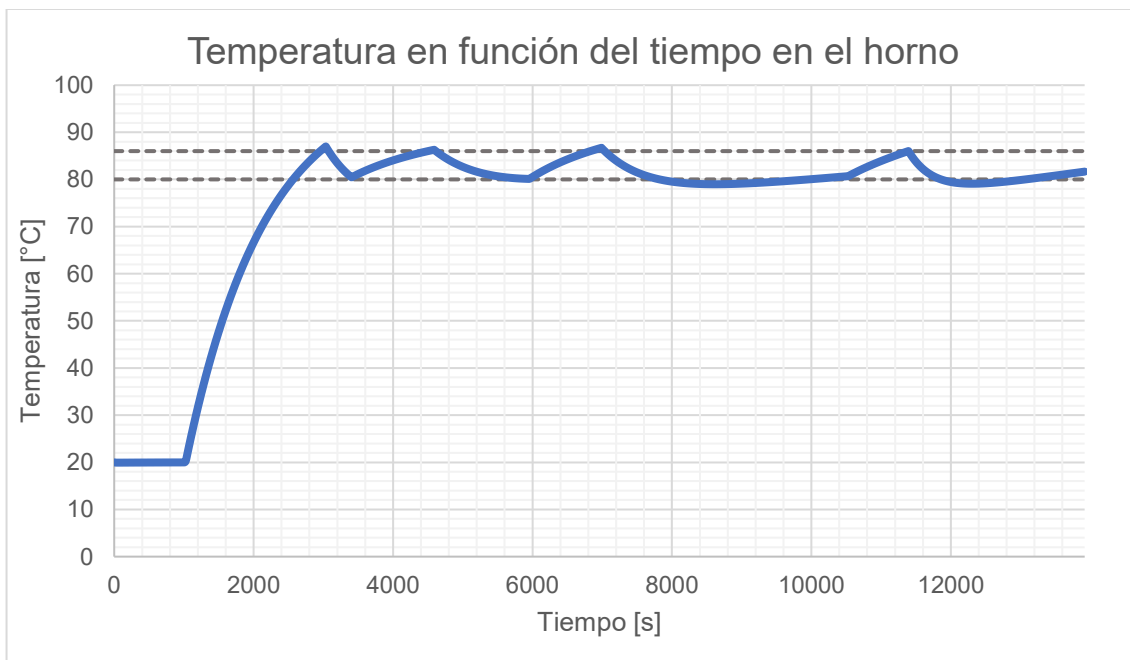


Figura 3.9 Variación de temperaturas en el horno durante el ciclo de cocción

Fuente: (Propia)



Figura 3.10 Flujo de vapor que entrega la caldera durante el ciclo de cocción
Fuente: (Propia)

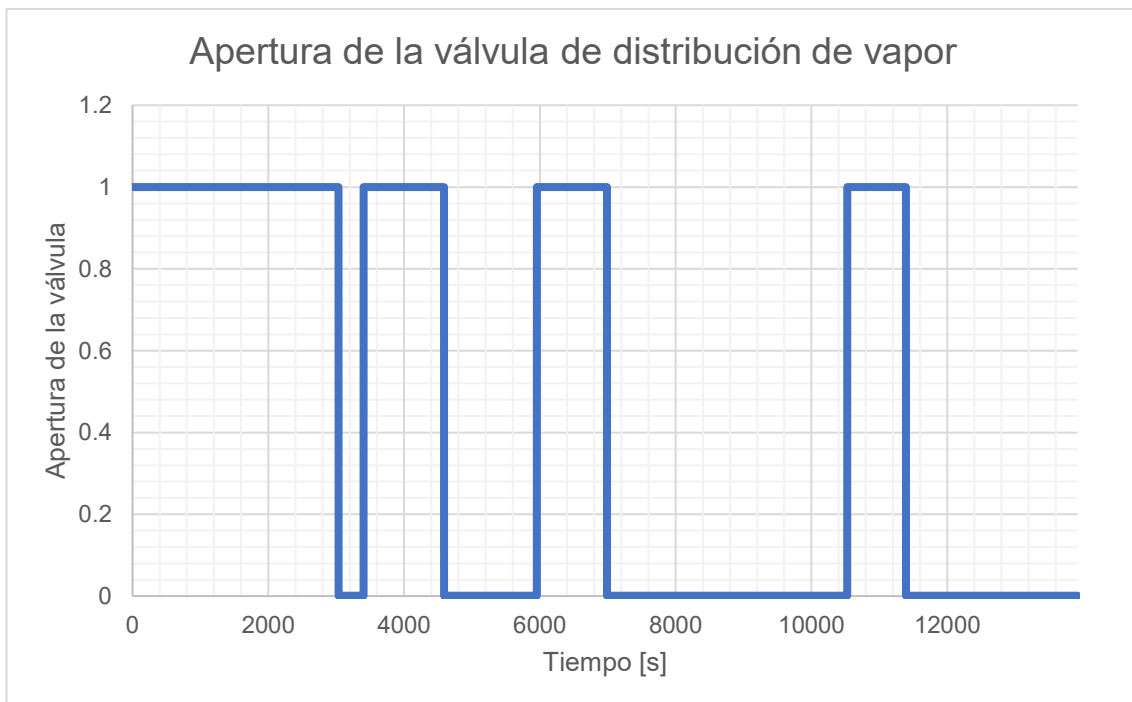


Figura 3.11 Apertura y cierre de la válvula principal durante el ciclo de cocción
Fuente: (Propia)

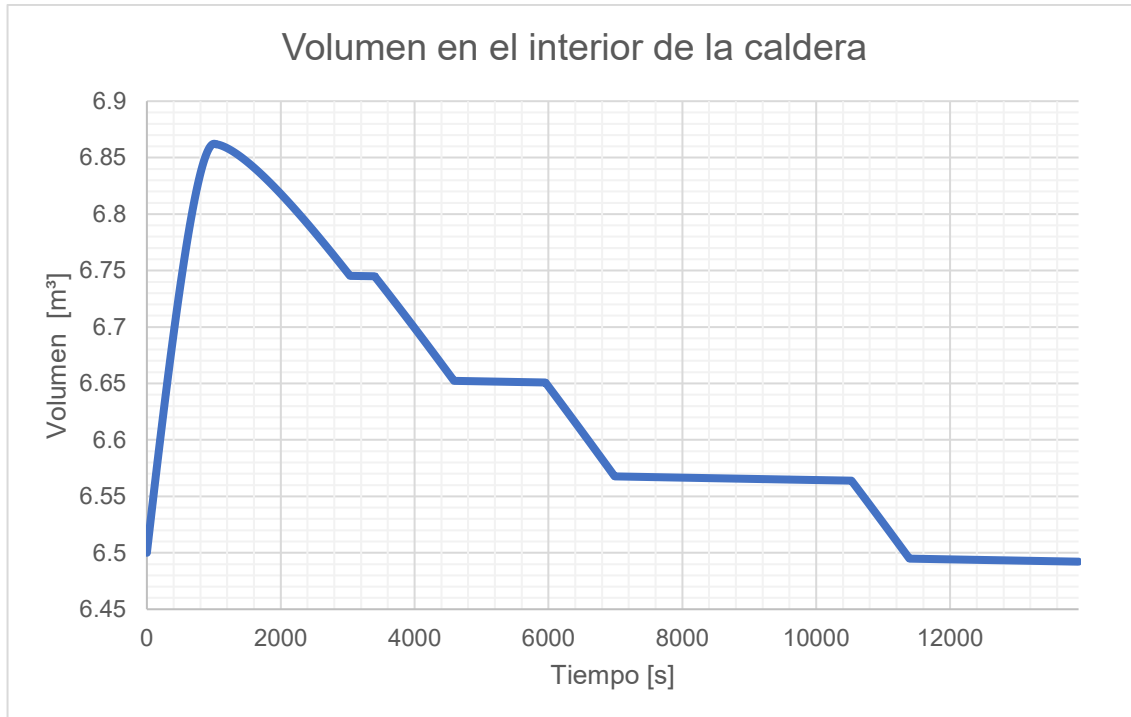


Figura 3.12 Volumen en el interior de la caldera durante el ciclo de cocción

Fuente: (Propia)

3.1.5 Análisis de resultados

El flujo de vapor entregado a la marmita y al horno se puede observar en la Figura 3.6 y Figura 3.10 respectivamente. Además, es posible corroborar el adecuado funcionamiento del sistema de control del quemador, puesto que, en los intervalos cercanos a cero se deben a que el quemador está apagado ya que los equipos de consumo no requieren más vapor y de esa manera en conjunto con la válvula se corta el suministro.

Como se menciona en el párrafo anterior la apertura y cierre de la válvula de distribución funciona en conjunto con el quemador. Por lo tanto, como se observa en la Figura 3.7 y Figura 3.11 se evidencia este comportamiento, donde se comparten los mismos tiempos en que la válvula y el quemador cambian su estado de acuerdo con la demanda de vapor en los equipos de consumo.

El control de volumen en el interior de la caldera durante el uso de la marmita se observa en la Figura 3.8, ahí se puede evidenciar picos que están relacionados con la variación de la apertura y cierre de la válvula y el quemador. Estos a su vez permite reconocer el adecuado funcionamiento del sistema de control en el modelo. Por otro lado, el control de volumen en el interior de la caldera durante el uso del horno se observa en la Figura 3.12 donde la tendencia de la gráfica aumenta en

el arranque y disminuye de manera escalonada durante el resto de las etapas del ciclo de cocción hasta estabilizarse en el valor requerido.

Finalmente, las temperaturas en ambos software simulados para la marmita y el horno muestran una tendencia en su comportamiento como se observa en la Figura 3.13 y Figura 3.14. Sin embargo, existe una diferencia notable en particular en el precalentamiento de ambas, cabe recalcar que los datos obtenidos en COMSOL Multiphysics es el más cercano a la realidad y se intentó adaptar esos datos en Wolfram System Modeler con sus respectivas limitaciones. Donde la más importante es que el software no permite simular en estado transitorio, para que de esa manera se pueda observar el comportamiento del sistema de vapor en completo.

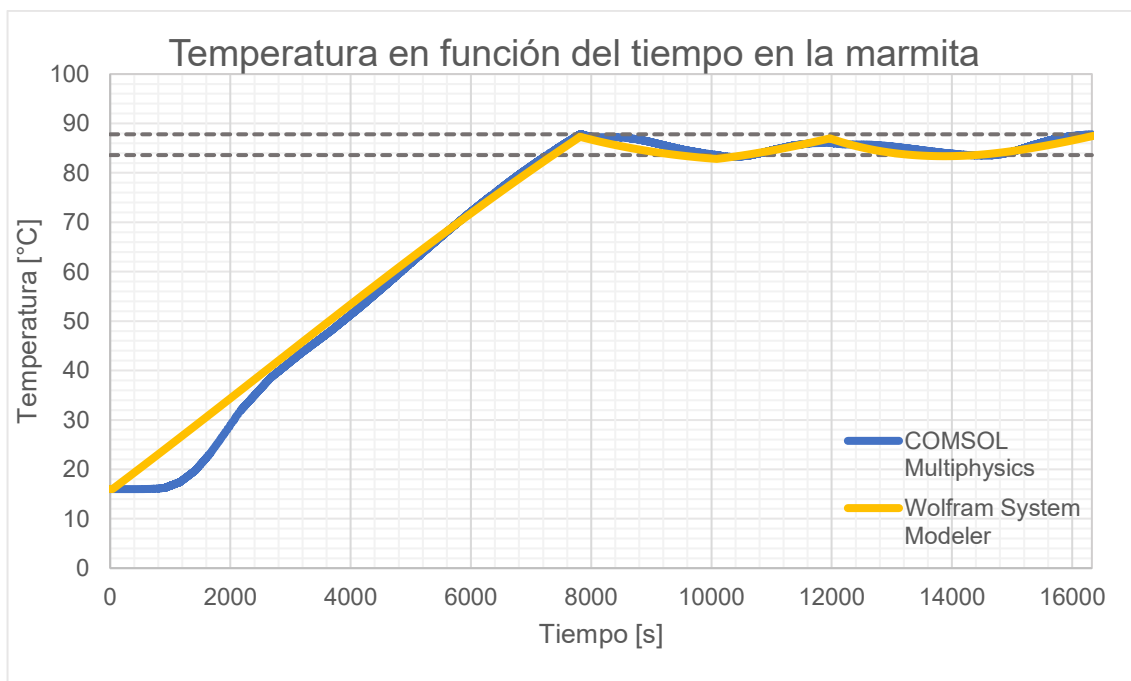


Figura 3.13 Comparación de temperaturas en la marmita entre COMSOL Multiphysics y Wolfram System Modeler

Fuente: (Propia)

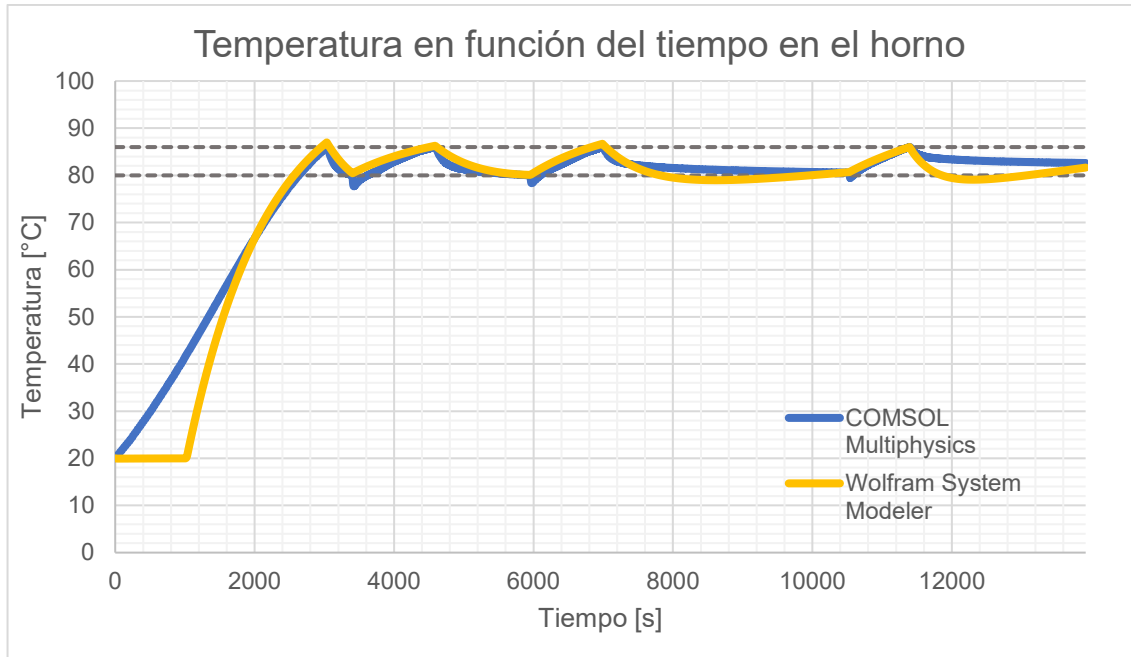


Figura 3.14 Comparación de temperaturas en el horno entre COMSOL Multiphysics y Wolfram System Modeler
Fuente: (Propia)

3.1.6 Validación de resultados

En esta sección se indican la validación de los resultados obtenidos en los equipos de consumo comparándolos con datos experimentales recolectados en equipos reales en operación, con el propósito de evaluar la precisión y confiabilidad de los modelos definidos durante el estudio. Se debe tener en cuenta que las condiciones de operación no son totalmente iguales puesto que no se cuenta con los datos necesarios para configurar todas las variables que intervienen durante un proceso real de funcionamiento.

3.1.6.1 Marmita

En la marmita la validación de resultados se da mediante los tiempos de cocción en base temperaturas obtenidas en el software simulado y los resultados obtenidos mediante un equipo con condiciones similares de funcionamiento. Para el fluido y los alimentos, las temperaturas que varía durante los intervalos son las que se observan en la Tabla 3.1, por lo tanto, el tiempo según los datos reales se define que se alcanza el precalentamiento del equipo considerado el estado transitorio en un tiempo de 7884 segundos [7]. Mediante la simulación del modelo se alcanza la misma temperatura en un periodo de 7815 segundos; dando como resultado un error del 0.9%.

Finalmente, el segundo parámetro de validación es el flujo de vapor generado por la caldera durante este periodo, como se puede observar en la Figura 3.6 en promedio el flujo de vapor generado es de 0.55 kg/s. Y mediante los datos obtenidos del equipo real el flujo de vapor generado es de 0.65 kg/s [7], dando como resultado un error del 15.4%. Por lo tanto, al ser las únicas variables de comparación entre el modelo simulado y los datos obtenidos de un equipo real se puede considerar como válido el modelado de la marmita.

3.1.6.2 Horno

En el caso del horno se cuenta solo con una variable de validación de resultados que es el tiempo de cocción con condiciones de temperatura establecidas en la Tabla 3.2, por lo tanto, el tiempo según los datos reales se define que alcanza el precalentamiento del equipo en un tiempo de 2840 segundos [26]. Y mediante el modelo simulado alcanza dichas condiciones en 3034 segundos, dando como resultado un error del 6.4%. Por lo tanto, al ser la única variable disponible para comparar además de que no se cuenta con todas las condiciones de funcionamiento necesarias para definir adecuadamente el modelo se puede considerar como válido el modelado del horno.

3.2 Conclusiones

En este trabajo se ha modelado y simulado un sistema de generación de vapor de una planta de alimentos en estado transitorio utilizando los códigos de Wolfram System Modeler y COMSOL Multiphysics:

- Para realizar la simulación del sistema de vapor en una planta de alimentos, se identificaron las condiciones de borde que definen un estado de transferencia de calor transitorio. En esta fase, se planteó un modelo de dos dimensiones en donde, con la ayuda del código COMSOL Multiphysics se determinaron los tiempos de calentamiento y enfriamiento de los equipos de consumo. Estos datos fueron exportados al programa Wolfram System Modeler.
- El modelado del sistema de vapor de la planta de alimentos se realizó con el programa Wolfram System Modeler, utilizando los datos obtenidos en COMSOL Multiphysics de los equipos de consumo, de tal manera que las termocupas fueron adaptadas a los perfiles de temperaturas obtenidos en COMSOL y se enviaron señales de entrada y salida para el control automático del sistema. Además, el control del tanque de vapor se realizó usando un controlador PID, el cual amortigua las señales de salida, proporcionando así un control más continuo.

- Se elaboraron descripciones detalladas de las funciones del software Wolfram System Modeler para el modelado y simulación de los sistemas de vapor, donde se destacaron sus capacidades en los sistemas térmicos además de los sistemas de control que se pueden incorporar para conformar un modelo más completo, lo que lo hace idóneo para el modelado de un sistema de vapor que requiera un análisis en función del tiempo.
- El modelado y simulación del sistema de vapor con sus respectivos consumidores se realizó de manera exitosa, puesto que, se pudo observar el comportamiento del sistema durante las etapas de transferencia de calor en estado transitorio pese a las limitaciones y el uso de un software de apoyo para las condiciones que no se podían realizar directamente en el sistema; facilitando una información valiosa sobre su desempeño.
- Los resultados para la validación fueron las temperaturas y el flujo másico con datos experimentales obtenidos en equipos previamente, demostrando una alta concordancia y afirmando la confiabilidad y precisión de los modelos desarrollados durante las diversas etapas de simulación, observando una diferencia del 0.9% para la temperatura en la marmita, 6.4% para la temperatura del horno y un 15.4% para el flujo de vapor entregado por la caldera.
- Los valores simulados por COMSOL Multiphysics muestran una buena aproximación con los controlados programados en Wolfram System Modeler, observándose una diferencia de valores entre $\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante las etapas de calentamiento y enfriamiento en los equipos de consumo (ver Figura 3.13 y Figura 3.14).

3.3 Recomendaciones

- Como un análisis complementario para el modelo se puede implementar el sistema de retorno de condensado, esto para observar la variación de los diferentes componentes del sistema de vapor modelado.
- Se puede realizar un acople interactivo entre el código de COMSOL Multiphysics y el código de Wolfram System Modeler, con el objetivo de intercambiar los parámetros de temperaturas entre ambos. Esto optimiza los tiempos de simulación y se representaría mejor el funcionamiento de los equipos de consumo.
- Adicionalmente se puede usar la integración de dos sistemas comerciales usando la arquitectura OPC (OLE for Process Control) que permita la comunicación de datos en tiempo real entre diferentes dispositivos y sistemas de control de diferentes fabricantes.

- Ampliar la base de datos experimentales para la validación de nuestro modelo, estos pueden ser temperatura, presión de vapor, flujo masico. Además, implementar otros equipos de consumo que no fueron considerados durante este modelo.
- Implementar un controlador PID para los quemadores para optimizar la regulación de la temperatura, asegurar una combustión eficiente y mantener una operación estable, lo que resultará en una mejora en el rendimiento energético del sistema y una reducción en el consumo de combustible y emisiones contaminantes.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Borroto Nordelo y A. Rubio González, “Combustión y Generación de Vapor”, Cienfuegos, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/333903191>
- [2] D. Einstein, E. Worrell, y M. Khrushch, “Steam Systems in Industry: Energy Use and Energy Efficiency Improvement Potentials”, Los Angeles, jul. 2001.
- [3] S. Prendes y E. Ramírez, “Diseño de Sistema de Generación de Vapor para planta de confitería en Riobamba”, Guayaquil, 2016.
- [4] J. Palacios, A. Peña, y V. Hidalgo, “Técnicas de Gestión Energética en Sistemas de Vapor”, *Revista Politécnica*, vol. 35, feb. 2015.
- [5] CACME, “Guía de eficiencia energética en sistemas de vapor”, *Comité Argentino del Consejo Mundial de Energía*, 2020.
- [6] C. Calle y P. Rosero, “Auditoría energética del sistema de vapor de la empresa DUCK’s S.A.”, Quito, 2011.
- [7] J. L. Palacios, “Auditoría energética de la caldera y el sistema de distribución vapor de la planta de elaborados y embutidos de Pronaca”, Quito, nov. 2009.
- [8] D. Cheridi, A. Lyria, D. Amel, B. Abdellah, y D. Ahmed, “Transient simulation of an industrial steam boiler”, *ALGERIAN JOURNAL OF SIGNALS AND SYSTEMS (AJSS)*, vol. 7, 2022.
- [9] Asesorésimásd, “¿Qué son los HORNOS de Convección a Vapor?” Consultado: el 30 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://asesoresimasd.com/que-son-los-hornos-de-conveccion-a-vapor-en-la-industria-alimentaria/>
- [10] E. Chacaguasay y C. Picho, “Diseño y construcción de una marmita cilíndrica con agitador y fondo esférico con rango de temperatura de 70°C a 80°C para producción de 50 litros de aderezos”, Quito, abr. 2016.
- [11] CertoClav, “¿Cómo funciona un autoclave de vapor? - CertoClav”. Consultado: el 30 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://certoClav.com/es/como-funciona-un-autoclave-de-vapor/>
- [12] M. Ortolá, P. Fito, y M. Castro, “Tipos de evaporadores en la industria alimentaria”, Valencia, 2018.
- [13] K. Rozhdestvensky *et al.*, “Computer Modeling and Simulation of Dynamic Systems Using Wolfram SystemModeler”, Singapore, 2020.
- [14] Wolfram, “System Modeler Top Features”. Consultado: el 5 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.wolfram.com/system-modeler/features/>
- [15] Wolfram, “How System Modeler Compares to Other Modeling Systems”. Consultado: el 5 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.wolfram.com/system-modeler/modeling-tools-comparison/>

- [16] Wolfram, “Modelica: Fluid - System Modeler Documentation”. Consultado: el 3 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://reference.wolfram.com/system-modeler/libraries/Modelica/Modelica.Fluid.html>
- [17] P. A. Fritzson, *Introduction to modeling and simulation of technical and physical systems with Modelica*. Wiley, 2011.
- [18] Y. Çengel y A. Ghajar, “Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones”, *McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.*, 2011.
- [19] KCE, “Fluid Property Calculator - KCE - English”. Consultado: el 22 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://thermofluidprop.com/en/properties-online/fluid-property-calculator>
- [20] Equipo H, “Marmita con autoclave ICOS PTFIG500/A | Marmitas industriales”. Consultado: el 22 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.equipoH.com/marmita-industrial-fija/marmita-redonda-fija-con-autoclave-icos-ptfig500a-2870.html>
- [21] Jacusa, “Jamón cocido espalda alpino por pieza – jamones curados Jacusa S.A”, 2024. Consultado: el 22 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://jacusa.com.ve/producto/jamon-cocido-espalda-alpino-por-pieza/>
- [22] VEMAG, “Instalación combinada para el tratamiento térmico de alimentos”, 2007.
- [23] J. C. Almachi y J. Pilliza, “Diseño y construcción de un equipo para el estudio de transferencia de calor en superficies extendidas en estado estable, destinado al laboratorio de transferencia de calor de la Escuela Politécnica Nacional”, Quito, oct. 2013.
- [24] Wolfram, “Modelica: Fluid.UsersGuide.Overview - System Modeler Documentation”. Consultado: el 3 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://reference.wolfram.com/system-modeler/libraries/Modelica/Modelica.Fluid.UsersGuide.Overview.html>
- [25] Calsat, “Cantidad de agua necesaria en una caldera - Calsat”. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://calsat.es/cantidad-de-agua-necesaria-en-una-caldera/>
- [26] C. Quiroz y S. Villacís, “Diseño e implementación de un sistema de control automático para dos hornos a vapor utilizados para la elaboración de embutidos”, sep. 2020.

5 ANEXOS

5.1 Anexo A: Construcción del modelo de la marmita en COMSOL Multiphysics

En esta sección se detalla los pasos para el modelado y simulación de la marmita mediante COMSOL Multiphysics versión 6.1.

La selección del asistente para la creación del nuevo modelo y la dimensión del espacio en que se va a realizar el modelo se muestra en la Figura 5.1.



Figura 5.1 Selección de asistente y dimensión de espacio del modelo

Fuente: (Propia)

A continuación, se selecciona la física que para este caso se considera fluido laminar y posteriormente el tipo de estudio temporal que permite analizar el comportamiento transitorio del modelo como se observa en la Figura 5.2 y Figura 5.3.

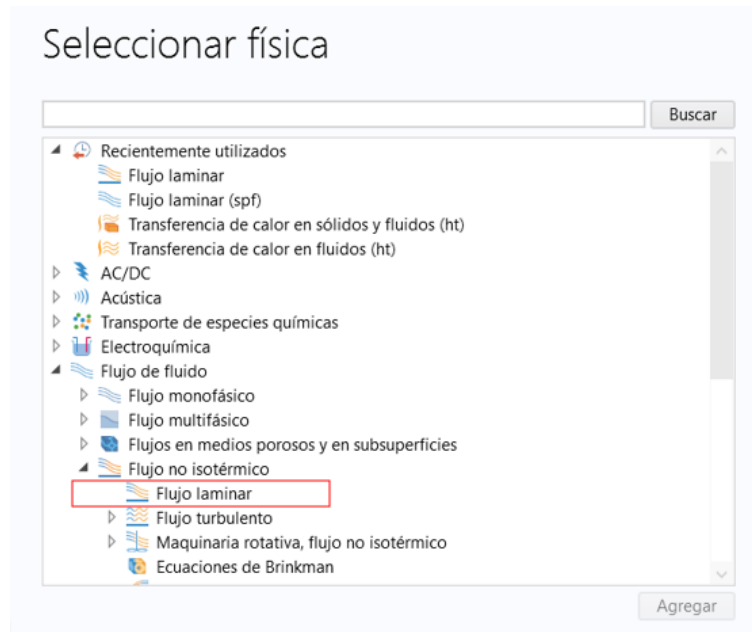


Figura 5.2 Selección de la física del modelo

Fuente: (Propia)

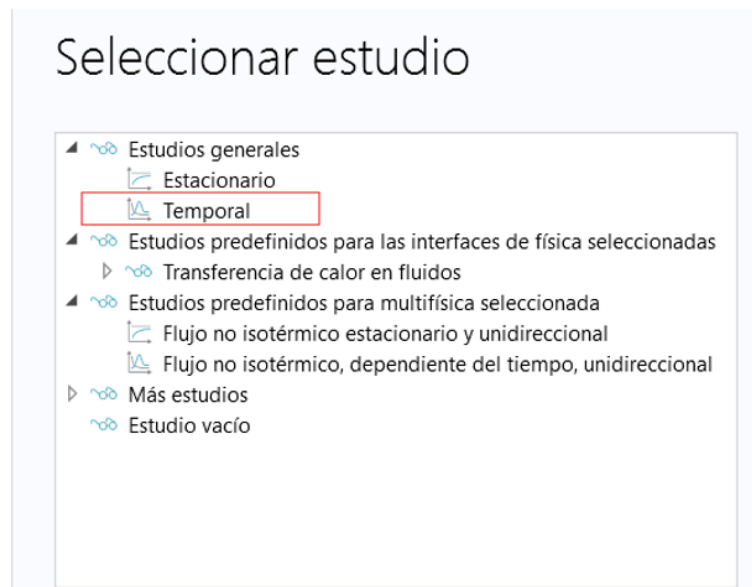


Figura 5.3 Selección del estudio del modelo

Fuente: (Propia)

Una vez seleccionado todos los parámetros se abre la interfaz para la creación de la geometría, definición de propiedades y simulación como se observa en la Figura 5.4.

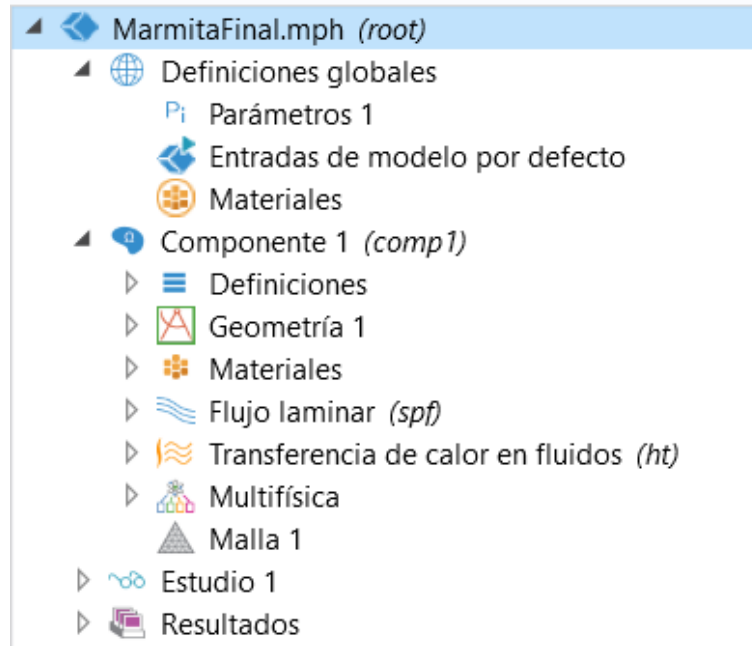


Figura 5.4 Interfaz para la definición de los parámetros del modelo

Fuente: (Propia)

Seguidamente, se define la geometría como se observa en la Figura 5.5 en función de las dimensiones definidas en la Tabla 2.3, se debe indicar que se realizaron dos geometrías diferentes puesto que en la primera solo se simula el precalentamiento y en la segunda una vez que se introducen los alimentos para su cocción. En los materiales como se puede observar en la Figura 5.6 se definió un acero AISI 316 para las paredes, el fluido que es el agua y el jamón; las propiedades del acero y el agua se seleccionan automáticamente de la biblioteca del software, y las del jamón se las definieron de acuerdo con las propiedades indicadas en la Tabla 2.1.

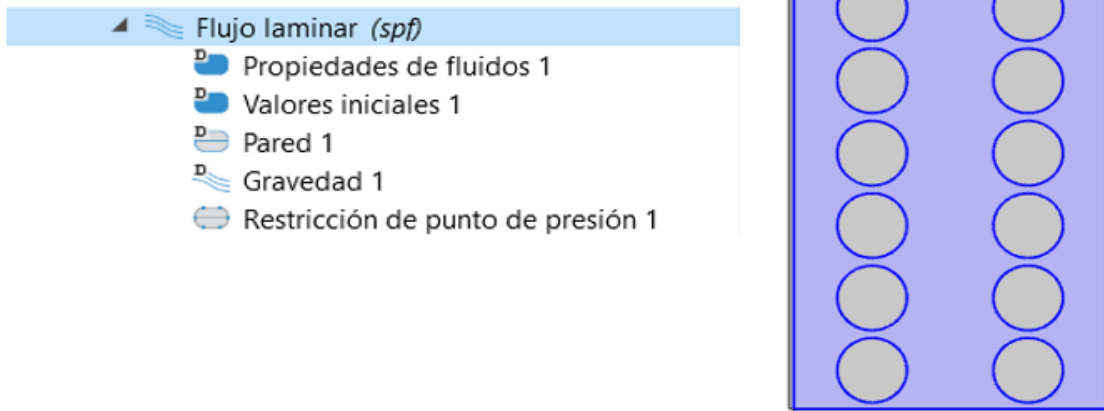


Figura 5.7 Configuración del flujo laminar en el modelo

Fuente: (Propia)

En el módulo de transferencia de calor es necesario diferenciar los fluidos y sólidos, que para este caso los sólidos representan las paredes y los alimentos. En Valores iniciales 1 se define la temperatura inicial de las paredes y fluidos, el aislamiento térmico se mantiene con la configuración por defecto, en Flujo de calor 1 se define el h de convección y temperatura ambiente como se observa en la Figura 5.8, en Valores iniciales 2 se configura la temperatura de los alimentos y finalmente, la Temperatura 1 es constante igual a 100°C y se ubica en la base de la marmita.

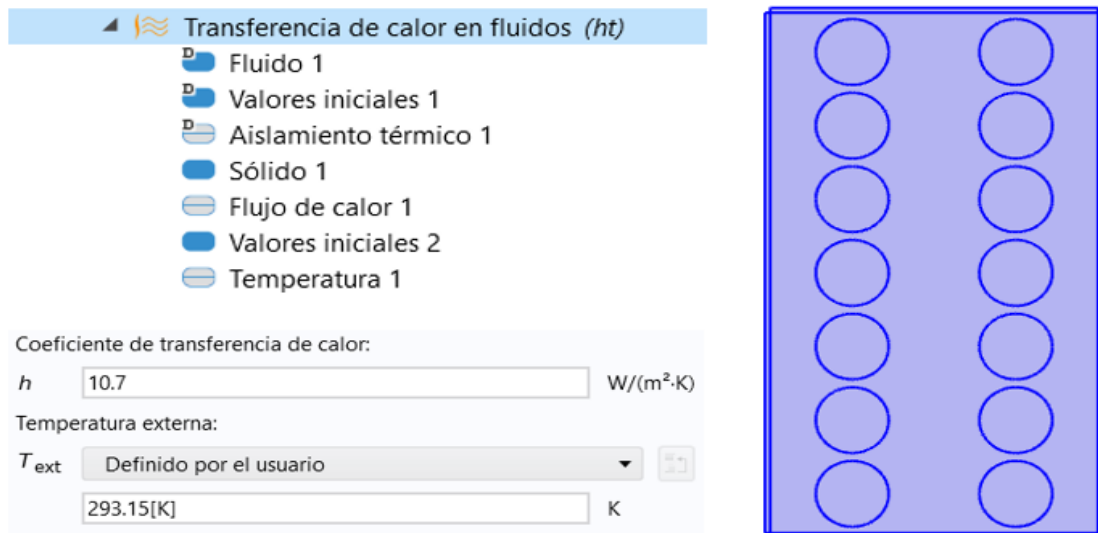


Figura 5.8 Configuración de transferencia de calor en fluidos en el modelo

Fuente: (Propia)

Cabe recalcar que las temperaturas tanto del fluido, paredes y alimentos se modifican manualmente de acuerdo con los intervalos de tiempo mostrados en la Tabla 2.6. De igual manera, para los periodos de disminución de temperatura se deshabilita la Temperatura 1 esto considerando que en estos intervalos se cierra el paso de vapor.

Se define la malla del modelo, para este caso se selecciona un tamaño extra grueso debido a la poca complejidad que mantiene el sistema como se observa en la Figura 5.9.

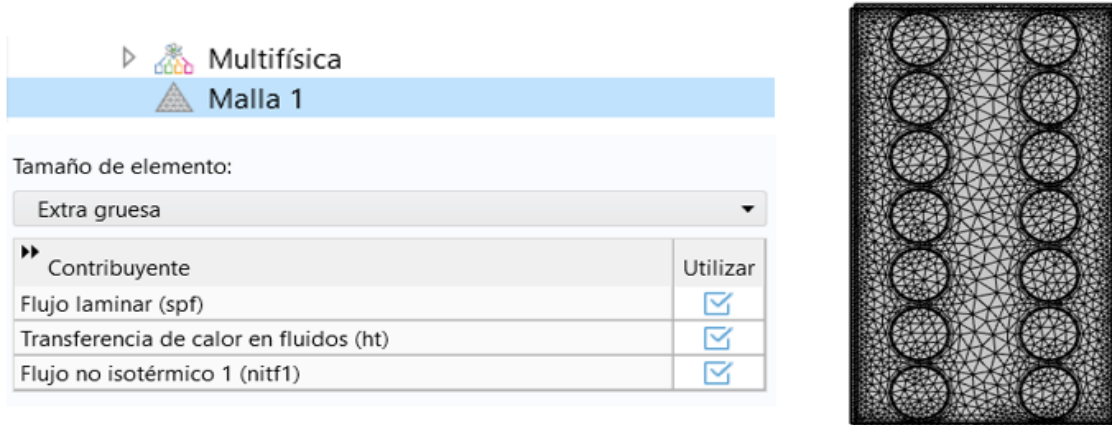


Figura 5.9 Configuración de la malla en el modelo

Fuente: (Propia)

La configuración del estudio para la simulación de la marmita se muestra en la Figura 5.10, para esto se define una tolerancia de 0.5 puesto que no se requiere una alta precisión en el sistema, y los rangos de tiempo se definen con un paso de 1 segundo y la duración varía de acuerdo con la etapa que se encuentre simulando.

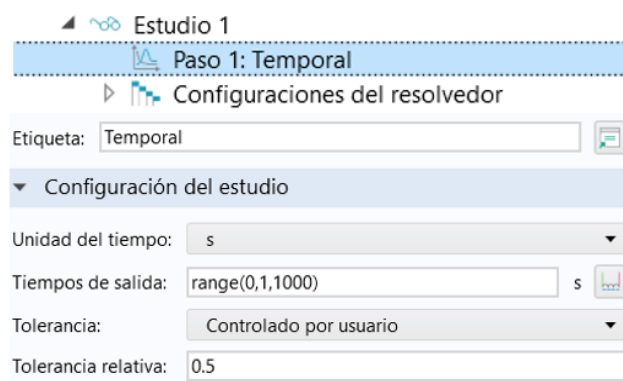


Figura 5.10 Configuración del estudio en el modelo

Fuente: (Propia)

Finalmente, para la visualización de resultados se definen puntos en el fluido y en los alimentos para obtener las temperaturas que posteriormente se llevan a una hoja de cálculo para su procesamiento y generación de gráficos como se observa en la Figura 5.11.

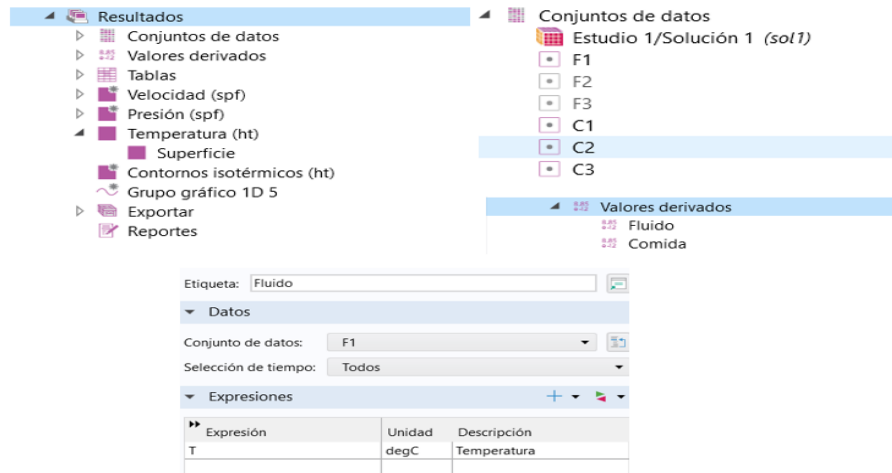


Figura 5.11 Configuración de los puntos para tabulación de datos

Fuente: (Propia)

Además, en la pestaña temperatura se puede visualizar los gráficos en cualquier instante de tiempo durante la simulación como se observa en la Figura 5.12.

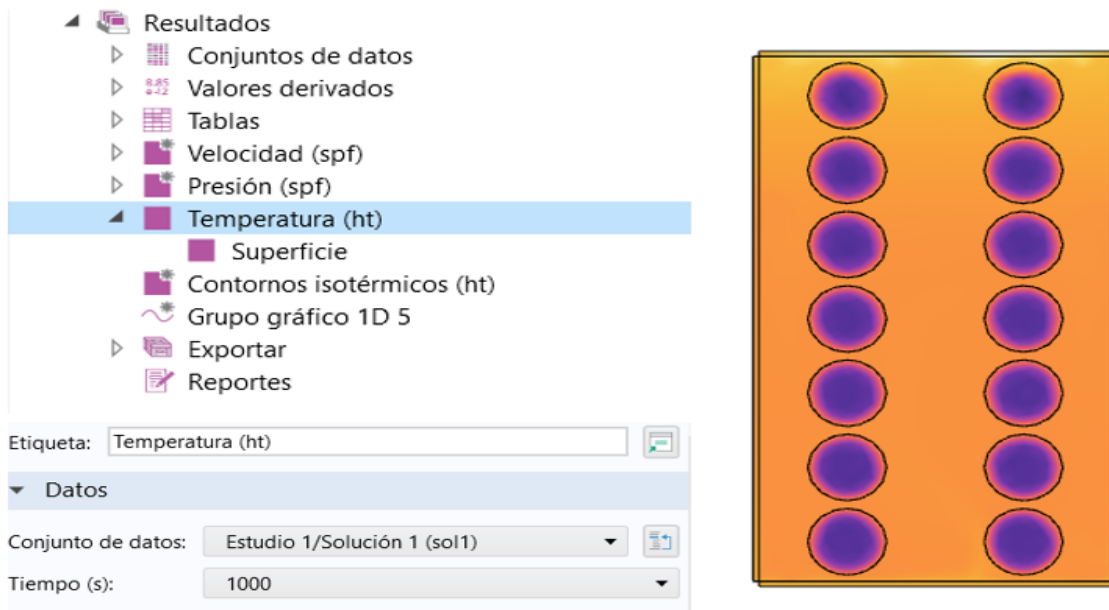


Figura 5.12 Configuración del instante de tiempo para la visualización de temperaturas

Fuente: (Propia)

5.2 Anexo B: Construcción del modelo del horno en COMSOL Multiphysics

En esta sección se detalla los pasos para el modelado y simulación del horno mediante COMSOL Multiphysics versión 6.1. Para esto es necesario seguir los mismos pasos que en el capítulo anterior con respecto a la selección del asistente, dimensión de espacio, física y tipo de estudio.

A continuación, se define la geometría como se observa en la Figura 5.13 en función de las dimensiones definidas en la Tabla 2.4, al igual que la marmita se realizaron dos geometrías diferentes puesto que en la primera solo se simula el precalentamiento y en la segunda una vez que se introducen los alimentos para su cocción. En los materiales como se puede observar en la Figura 5.14 se definió un acero AISI 316 para las paredes, el fluido que es el aire y el jamón; las propiedades del acero y el aire se seleccionan automáticamente de la biblioteca del software, y las del jamón se las definieron de acuerdo con las propiedades indicadas en la Tabla 2.1.

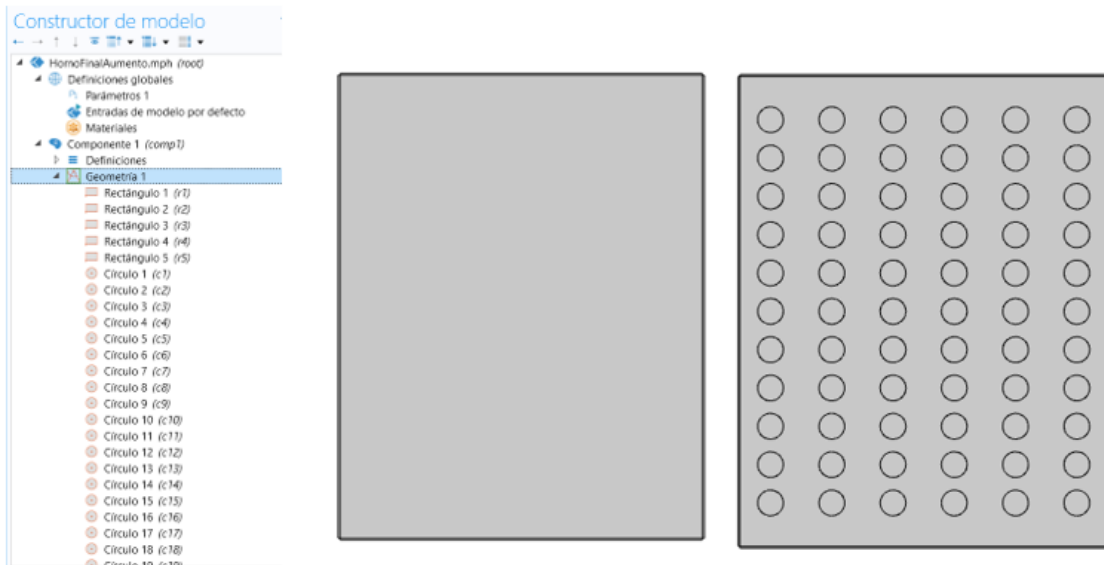


Figura 5.13 Geometría del horno

Fuente: (Propia)

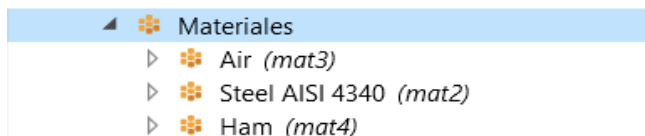


Figura 5.14 Materiales utilizados en el modelo

Fuente: (Propia)

En el flujo laminar es necesario definir el área de control que es el fluido, la gravedad y un punto de presión que se ubica en la parte superior derecha de la geometría, todos los valores se mantienen con la configuración por defecto que selecciona el software como se observa en la Figura 5.15.

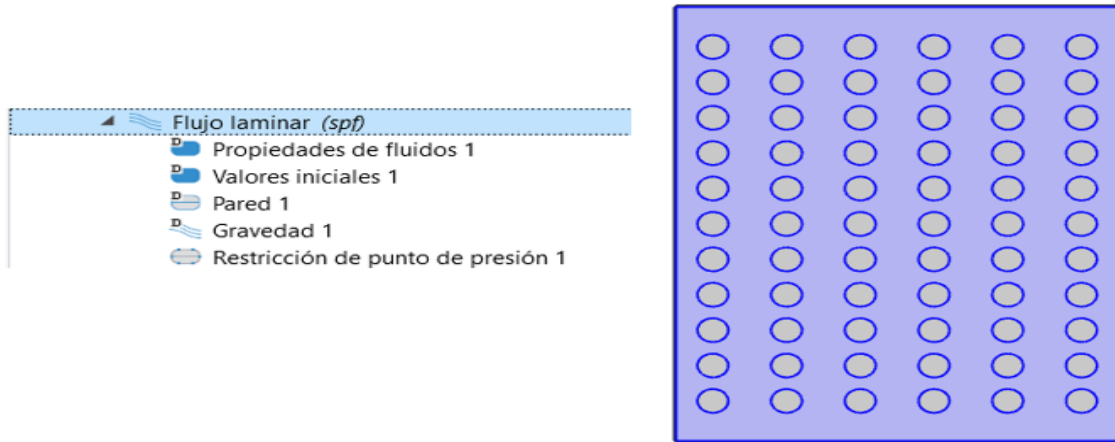


Figura 5.15 Configuración del flujo laminar en el modelo

Fuente: (Propia)

En el módulo de transferencia de calor es necesario diferenciar los fluidos y sólidos, que para este caso los sólidos representan las paredes y los alimentos. En Valores iniciales 1 se define la temperatura inicial de las paredes y fluidos, el aislamiento térmico se mantiene con la configuración por defecto, en Flujo de calor 1 se define el h de convección y temperatura ambiente como se observa en la Figura 5.16, en Valores iniciales 2 se configura la temperatura de los alimentos y finalmente, la Temperatura 1 es constante igual a 100°C y se ubica en el techo del horno.

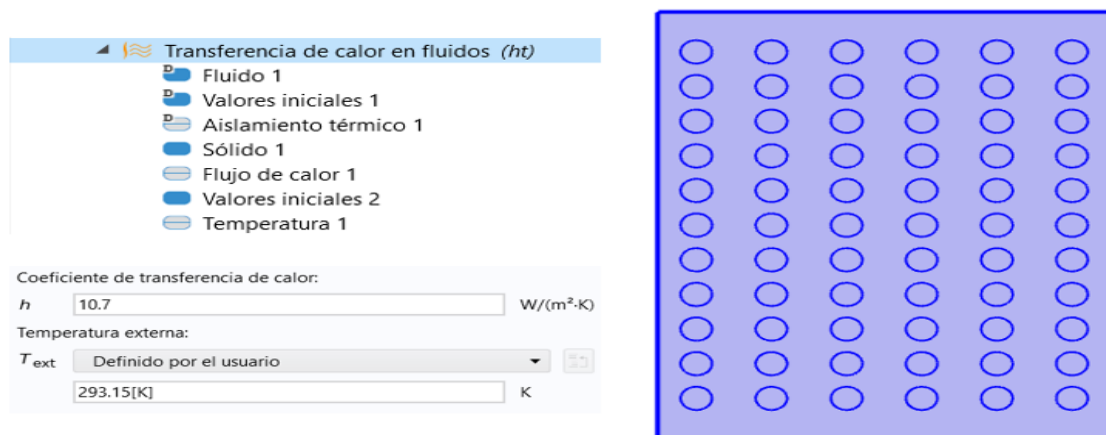


Figura 5.16 Configuración de transferencia de calor en fluidos en el modelo

Fuente: (Propia)

Cabe recalcar que las temperaturas tanto del fluido, paredes y alimentos se modifican manualmente de acuerdo con los intervalos de tiempo mostrados en la Tabla 2.6. De igual manera, para los periodos de disminución de temperatura se deshabilita la Temperatura 1 esto considerando que en estos intervalos se cierra el paso de vapor.

Se define la malla del modelo, para este caso se selecciona un tamaño extra grueso debido a la poca complejidad que mantiene el sistema como se observa en la Figura 5.17.

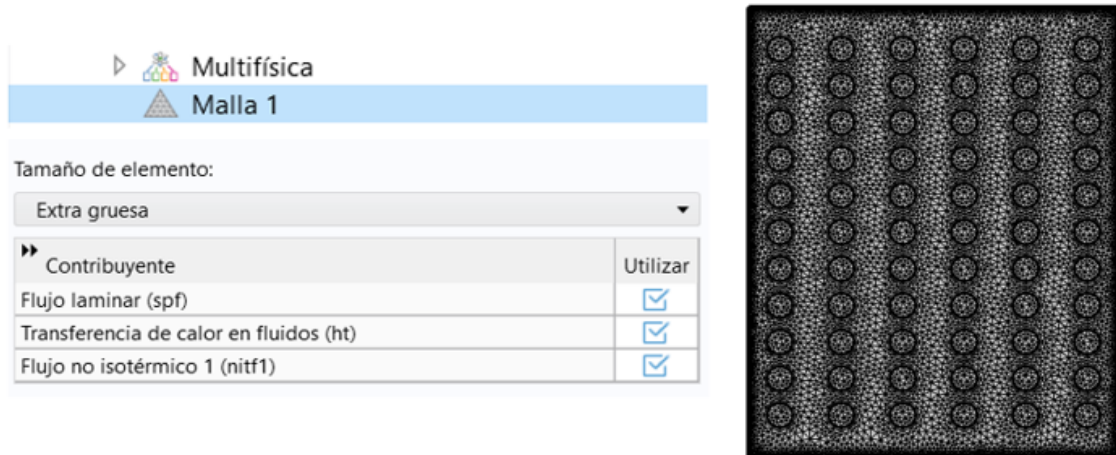


Figura 5.17 Configuración de la malla en el modelo

Fuente: (Propia)

En la configuración del estudio para la simulación de la marmita se define una tolerancia de 0.5 puesto que no se requiere una alta precisión en el sistema, y los rangos de tiempo se definen con un paso de 1 segundo y la duración varía de acuerdo con la etapa que se encuentre simulando como se muestra en la Figura 5.18.

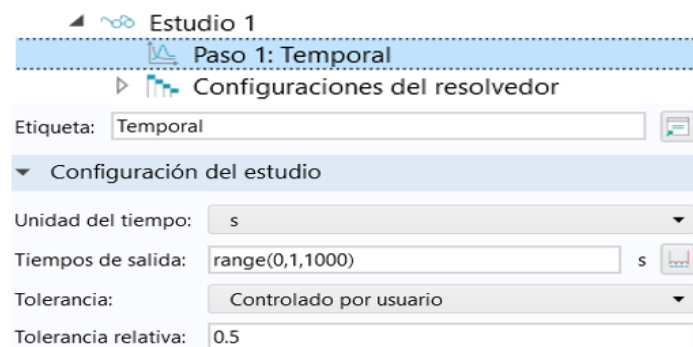


Figura 5.18 Configuración del estudio en el modelo

Fuente: (Propia)

Finalmente, para la visualización de resultados se definen puntos en el fluido y en los alimentos para obtener las temperaturas que posteriormente se llevan a una hoja de cálculo para su procesamiento y generación de gráficos como se observa en la Figura 5.19.

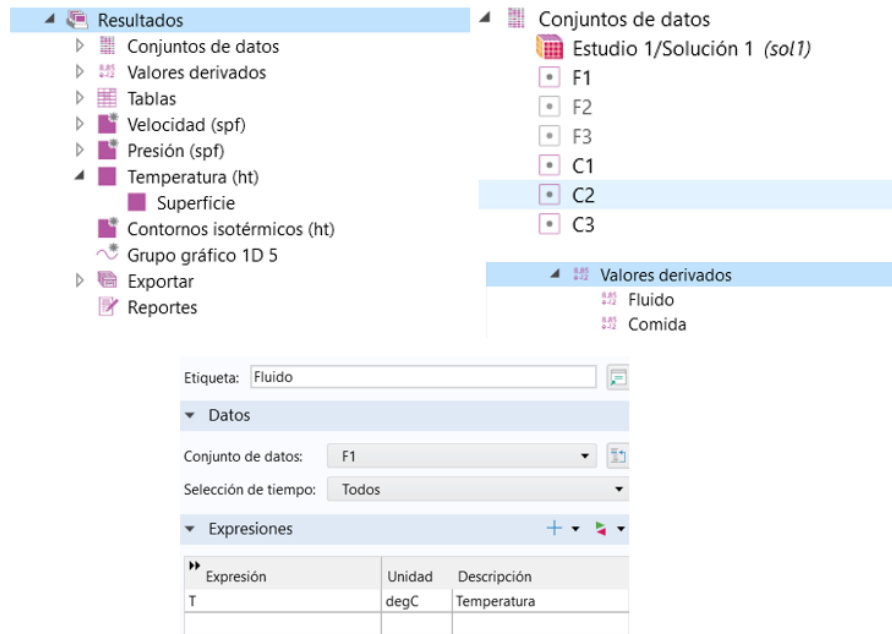


Figura 5.19 Configuración de los puntos para tabulación de datos

Fuente: (Propia)

Además, en la pestaña temperatura se puede visualizar los gráficos en cualquier instante de tiempo durante la simulación como se observa en la Figura 5.20.

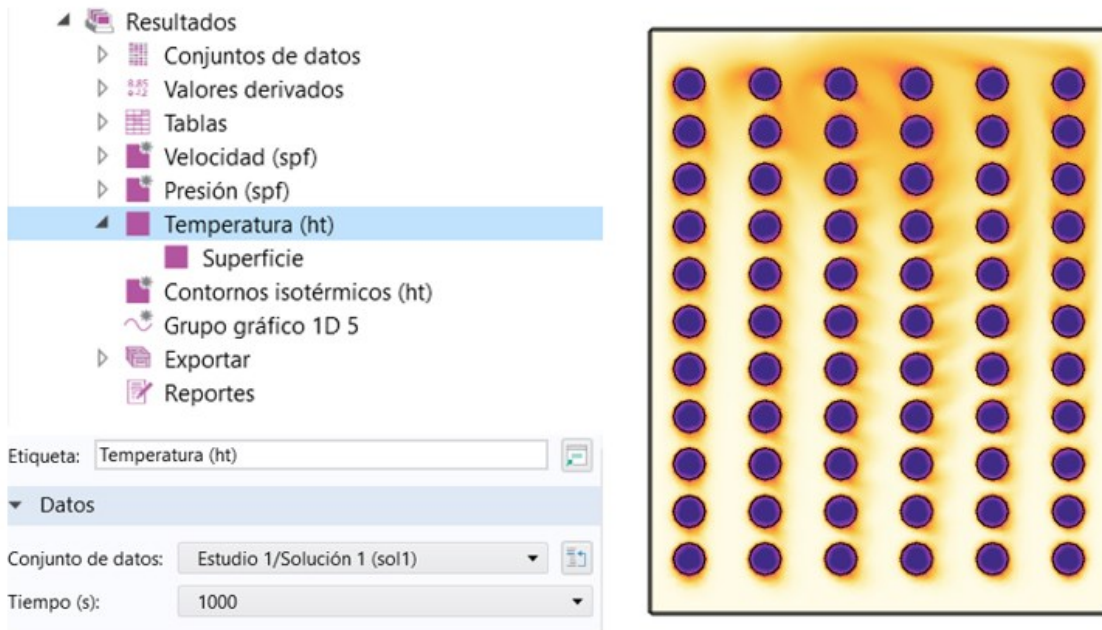


Figura 5.20 Configuración del instante de tiempo para la visualización de temperaturas

Fuente: (Propia)

5.3 Anexo C: Construcción del modelo del sistema de vapor con la marmita como equipo de consumo en Wolfram System Modeler

En esta sección se detalla los pasos para el modelado y simulación de la marmita mediante Wolfram System Modeler versión 14.0.

En primer lugar, es importante definir las condiciones ambientales, para lo cual como se observa en la Figura 5.21 se limita los valores de temperatura, presión y gravedad.

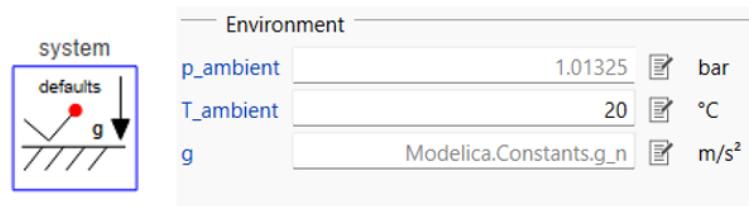


Figura 5.21 Configuración de las condiciones ambientales

Fuente: (Propia)

A continuación, para el equipo de generación de vapor es importante considerar el sistema de control del nivel, el control del quemador y la caldera. Para el control del nivel es necesario definir un Feedback capaz de recibir una señal de entrada del nivel de la caldera y una señal constante de

6.5 m³ que representa el nivel máximo permitido en su interior, además un controlador PI con los parámetros que se pueden observar en la Figura 5.22, por otra parte, se configura un Limiter con un valor máximo de 1.35 m³/s que representa el caudal máximo a la entrada de la caldera. Finalmente, el Pump representa la bomba que suministra el caudal de entrada y se lo configura con las condiciones del fluido y la entalpía.

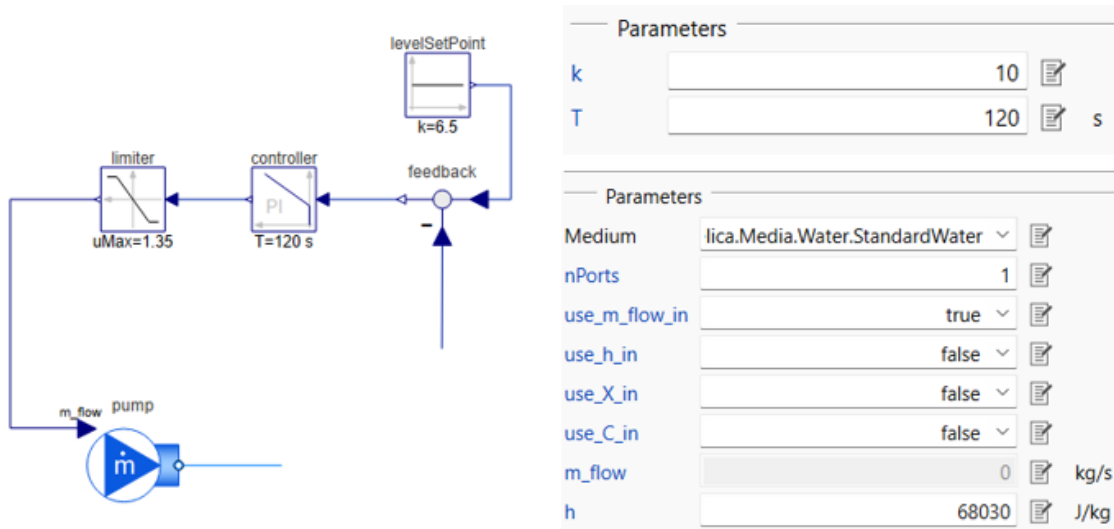


Figura 5.22 Configuración de las condiciones de control del nivel de la caldera

Fuente: (Propia)

En el control del quemador para el elemento Furnance se mantienen las condiciones definidas por defecto del software, se añade una ganancia que transforma los valores de megavatios a vatios y finalmente una tabla que como se observa en la Figura 5.23 se configuran los valores en los cuales debe estar encendida y apagada dependiendo de la etapa de la marmita.

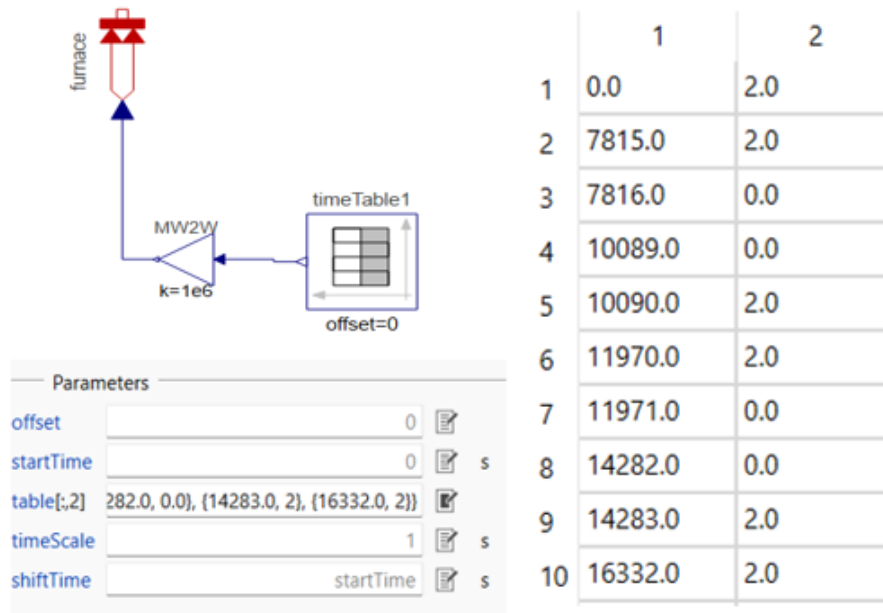


Figura 5.23 Configuración de las condiciones de control del quemador de la caldera
Fuente: (Propia)

En la caldera es necesario configurar valores de volumen, calor específico, presión inicial, temperaturas y entalpías como se observa en la Figura 5.24 que se encuentran definidas en la Tabla 2.2.

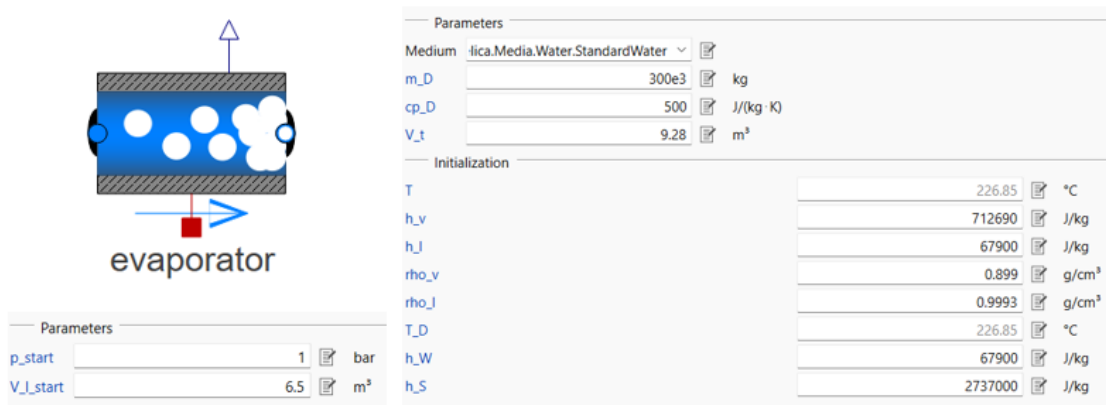


Figura 5.24 Configuración de las propiedades de la caldera
Fuente: (Propia)

El sistema de distribución que está compuesto por una válvula que se configura su presión nominal de funcionamiento, flujo nominal y el tipo de fluido. En la tabla como se observa en la Figura 5.25 es necesario configurar la apertura y cierre en función de los intervalos obtenidos en la Tabla 3.1.

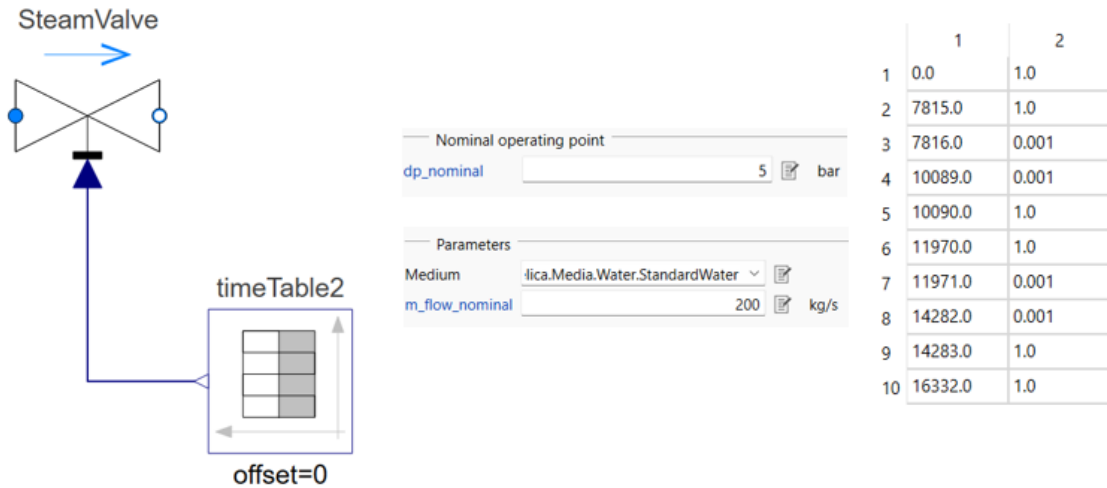


Figura 5.25 Configuración de las propiedades de la válvula

Fuente: (Propia)

Finalmente, en la marmita es necesario configurar el Volume que representa la cuba, el Pipe que representa el serpentín y las funciones Convection y Prescribed Temperature como se observa en la Figura 5.26 que representan las pérdidas de calor a través de los alimentos en su interior.

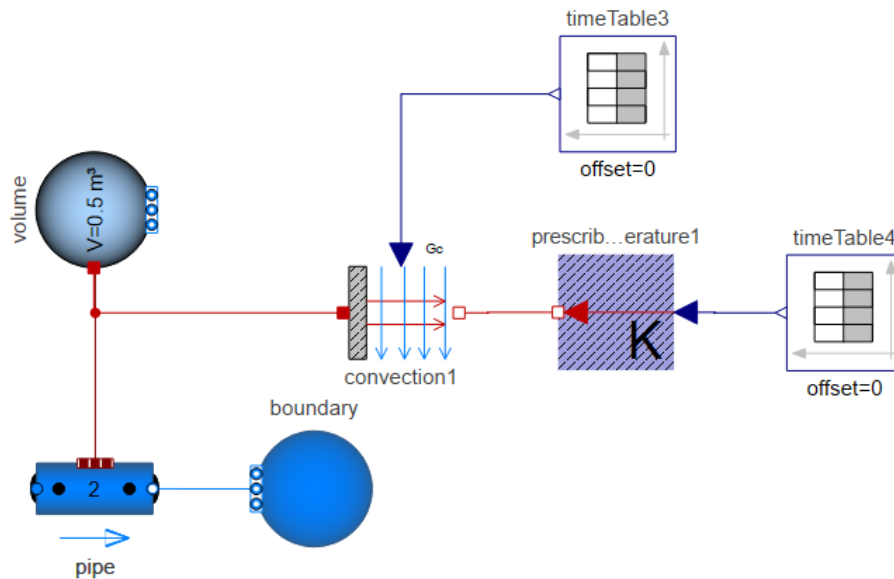


Figura 5.26 Modelo de la marmita

Fuente: (Propia)

En el Volume es necesario definir dimensiones, fluido, presión inicial, temperatura inicial y activar la transferencia de calor como se observa en la Figura 5.27.

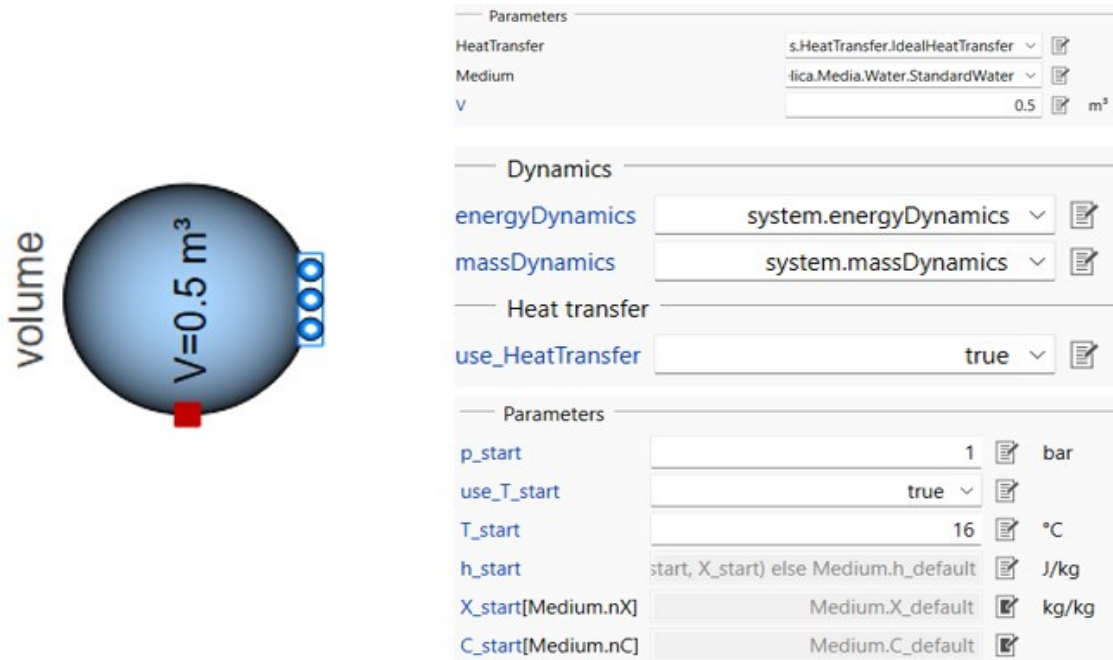


Figura 5.27 Configuración de las propiedades del Volume

Fuente: (Propia)

En la Pipe se define la transferencia de calor y las condiciones geométricas como se observa en la Figura 5.28 en base a la Tabla 2.3.

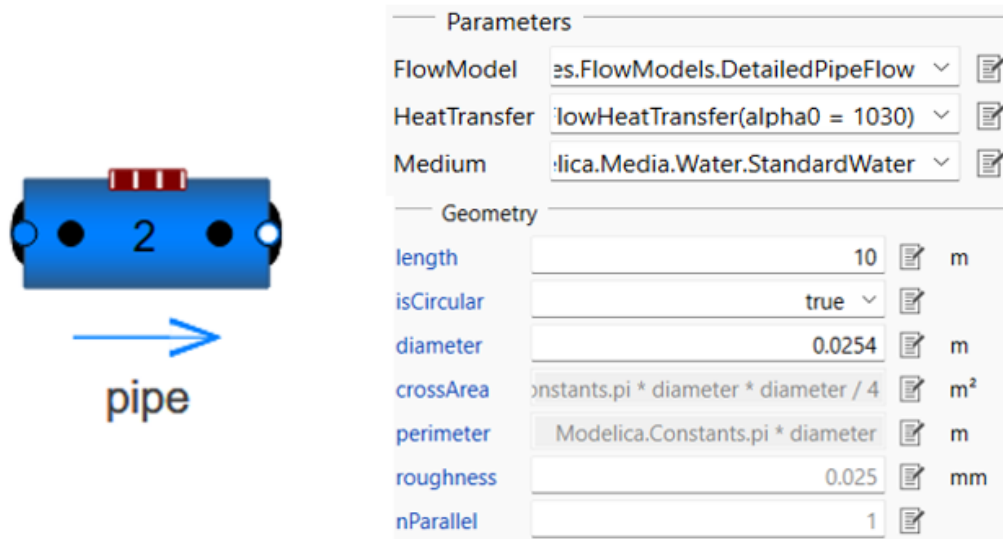


Figura 5.28 Configuración de las propiedades del Pipe

Fuente: (Propia)

En las funciones de Convection y Prescribed Temperature como se observa en la Figura 5.29 se definen en función de tablas en función de los intervalos previamente definidos de precalentamiento, aumento y disminución de temperatura. Cabe recalcar que los valores de convección y la potencia del quemador fueron definidos en un proceso iterativo hasta alcanzar las condiciones obtenidas en el software COMSOL Multiphysics.

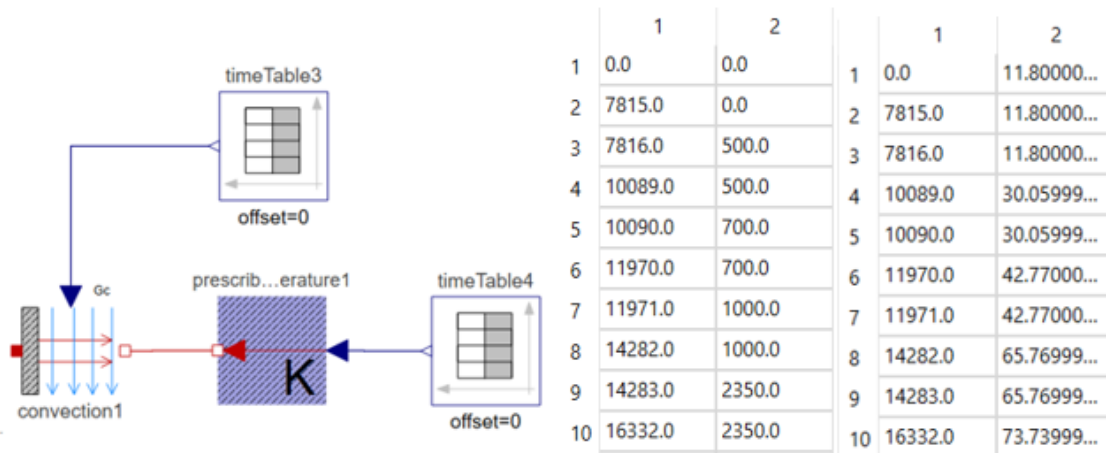


Figura 5.29 Configuración de las propiedades de las funciones Convection y Prescribed Temperature

Fuente: (Propia)

El Boundary se mantiene con las condiciones definidas por defecto en el software, puesto que, representa un depósito donde se acumula el condensado, por otra parte, en el elemento Mass flow rate es necesario configurar solo el tipo de fluido.

Es necesario configurar las condiciones de simulación de acuerdo con el tiempo definido Como se observa en la Figura 5.30.

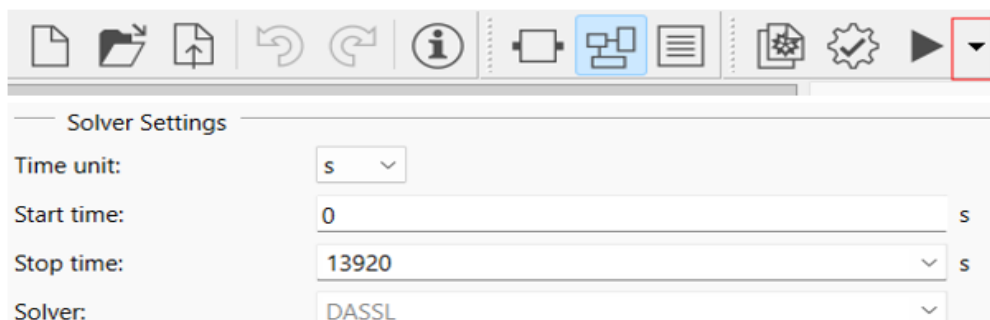


Figura 5.30 Configuración del tiempo de simulación

Fuente: (Propia)

Finalmente, se puede graficar cualquier variable deseada del modelo, además, es posible llevar los datos de estas en formato de texto para en una hoja de cálculo analizarlos y graficarlos en caso de realizar comparaciones como se observa en la Figura 5.31.

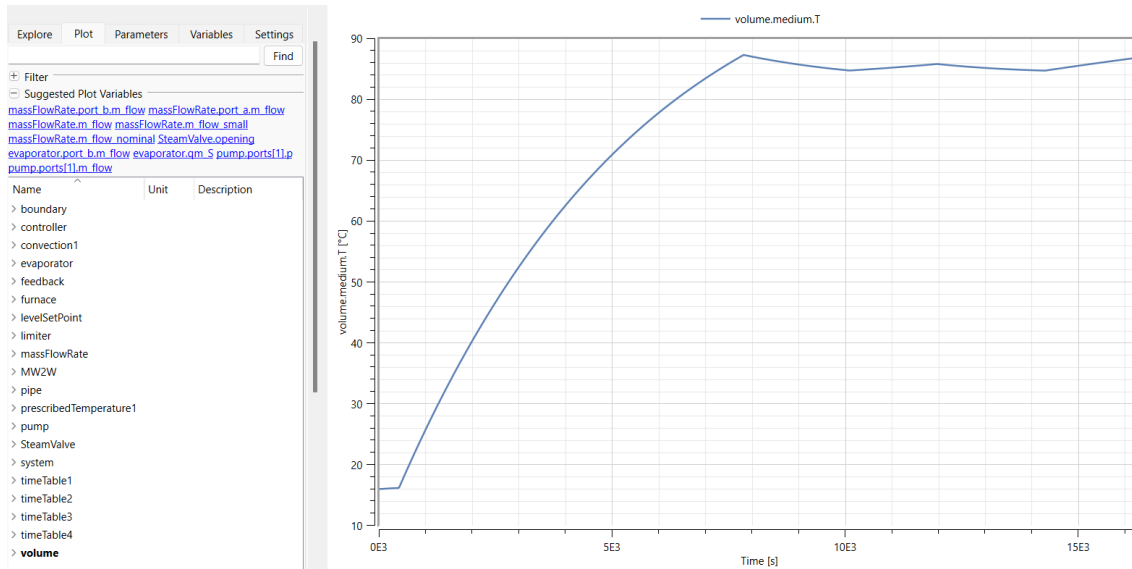


Figura 5.31 Selección de gráficos

Fuente: (Propia)

5.4 Anexo D: Construcción del modelo del sistema de vapor con el horno como equipo de consumo en Wolfram System Modeler

En esta sección se detalla los pasos para el modelado y simulación de la marmita mediante Wolfram System Modeler versión 14.0. Al igual que la marmita se mantiene con las mismas configuraciones del equipo de generación de vapor, con la diferencia que como se observa en la Figura 5.32 el quemador tendrá diferentes intervalos de encendido y apagado de acuerdo con la Tabla 3.2.

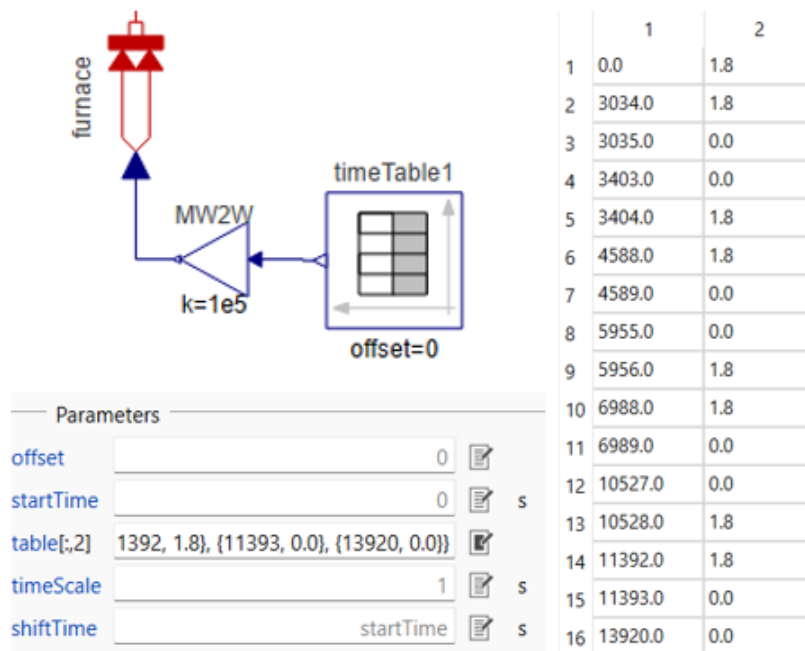


Figura 5.32 Configuración de las condiciones de control del quemador de la caldera

Fuente: (Propia)

El sistema de distribución que está compuesto por una válvula que se configura su presión nominal de funcionamiento, flujo nominal y el tipo de fluido. En la tabla como se observa en la Figura 5.33 es necesario configurar la apertura y cierre en función de los intervalos obtenidos en la Tabla 3.2.

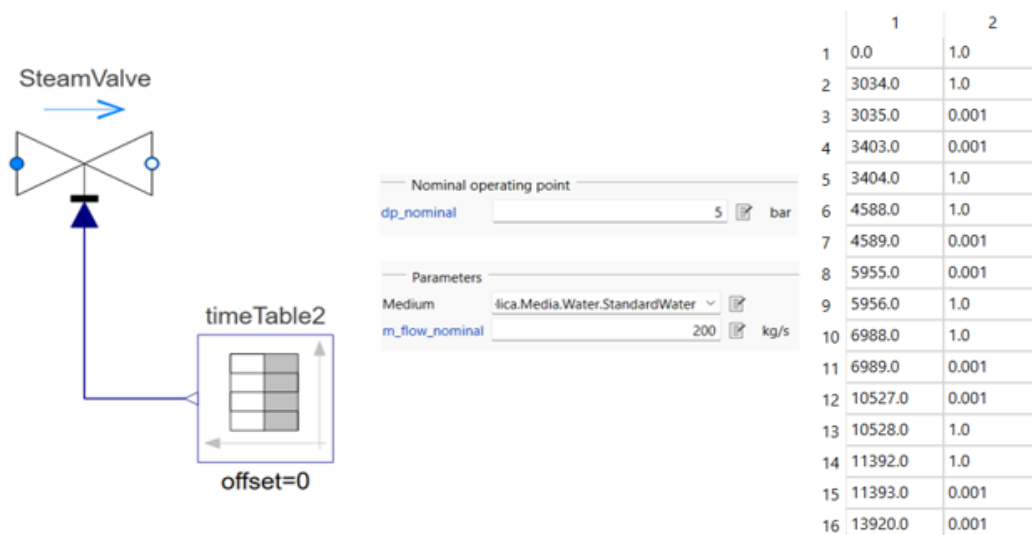


Figura 5.33 Configuración de las propiedades de la válvula

Fuente: (Propia)

Finalmente, en el horno es necesario configurar el Volume que representa la cuba, el Pipe que representa el serpentín y las funciones Convection y Prescribed Temperature que representan las pérdidas de calor a través de los alimentos en su interior como se observa en la Figura 5.34.

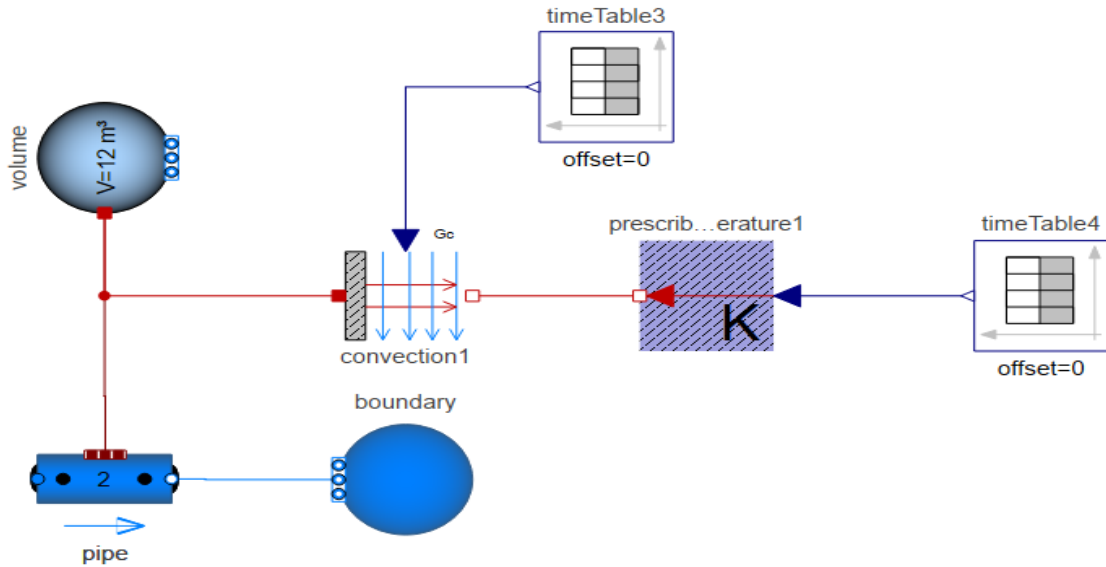


Figura 5.34 Modelo del horno

Fuente: (Propia)

En el Volume es necesario definir dimensiones, fluido, presión inicial, temperatura inicial y activar la transferencia de calor como se observa en la Figura 5.35.

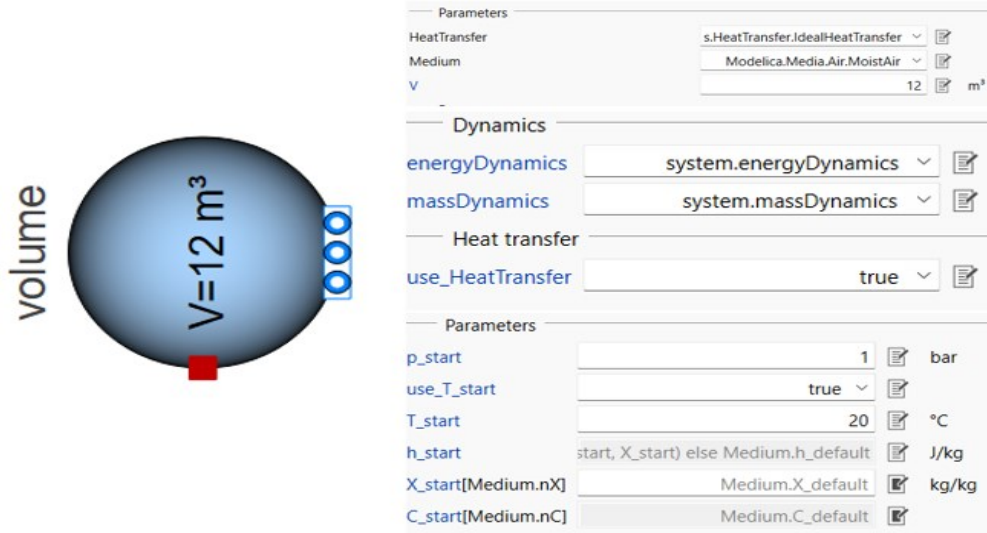


Figura 5.35 Configuración de las propiedades del Volume

Fuente: (Propia)

En la Pipe se define la transferencia de calor y las condiciones geométricas como se observa en la Figura 5.36 en base a la Tabla 2.4.

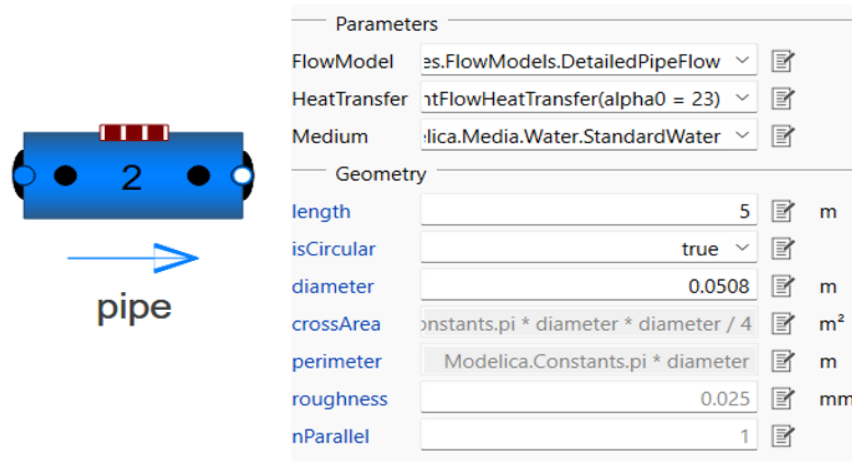


Figura 5.36 Configuración de las propiedades del Pipe

Fuente: (Propia)

En las funciones de Convection y Prescribed Temperature se definen en función de tablas en función de los intervalos previamente definidos de precalentamiento, aumento y disminución de temperatura como se observa en la Figura 5.37. Cabe recalcar que los valor de convección y la potencia del quemador fueron definidos en un proceso iterativo hasta alcanzar las condiciones obtenidas en el software COMSOL Multiphysics.

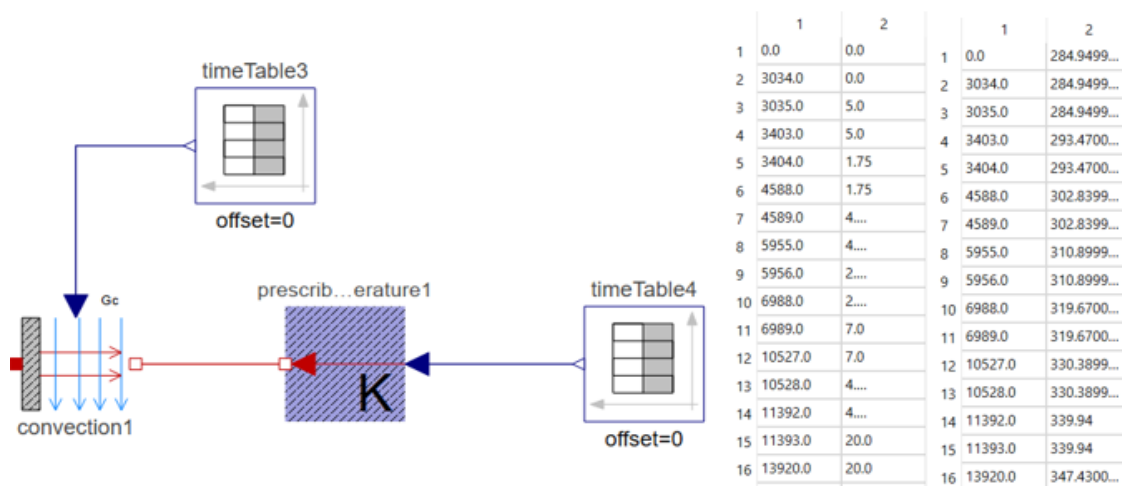


Figura 5.37 Configuración de las propiedades de las funciones Convection y Prescribed

Temperature

Fuente: (Propia)

El Boundary se mantiene con las condiciones definidas por defecto en el software, puesto que, representa un depósito donde se acumula el condensado, por otra parte, en el elemento Mass flow rate es necesario configurar solo el tipo de fluido.

Al igual que la marmita es necesario definir los intervalos de simulación y es posible observar las gráficas de cualquier variable definida en el modelo.