

Universidad de La Laguna  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
Sección Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

**Trabajo presentado para  
la obtención del título de:**

**GRADUADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS**

Presentado por

Álvaro Luis Luis

Algoritmo para la simulación de la transferencia de energía y determinación de la presión y temperatura del vapor en una caldera de vapor saturado orientado a su ejecución en un hardware libre.

Dirigido por

Carlos Éfren Mora Luis

Presentado en Septiembre 2017



# Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un algoritmo que simula tanto el aumento de temperatura como la generación de vapor en una caldera de vapor saturado.

El programa resultante se ha cargado en una placa Arduino Mega 2560 y los datos generados en la simulación se visualizan a través de una pantalla LCD y se escriben en el puerto serie de la placa.

La fundamentación teórica de este proyecto se basa en la termodinámica que describe el comportamiento de una caldera de vapor y sus subsistemas. Los datos necesarios para calcular las distintas ecuaciones que intervienen se obtienen a través de tablas de búsqueda que contienen las propiedades termodinámicas del agua en función de la presión y temperatura.

Tras varias simulaciones, las cuales se han realizado con el quemador a distintas potencias, se observa que la variación producida en el volumen de agua de la caldera como la presión generada se aproxima a los valores teóricos esperados. Esto lleva a considerar que la ejecución de este código, cuya duración depende del estado del quemador, es capaz de obtener valores próximos a los que se pueden recoger en una caldera real con las mismas dimensiones y en las mismas condiciones.



# Abstract

In the present work, an algorithm has been developed to simulate the temperature rise and the generation of steam in a saturated steam boiler.

The resulting program has been loaded into an Arduino Mega 2560 board, the data generated in the simulation are displayed on an LCD screen and they are written to the serial port of the board.

The theoretical basis of this project is grounded on the thermodynamics linked to the behaviour of a steam boiler and its subsystems. The required data to calculate the different equations involved are obtained by means of look-up tables which contain the thermodynamic properties of water in function of pressure and temperature.

After several simulations, which have been performed with the burner at different power levels, it has been observed that the variation produced in the volume of water of the boiler and the pressure generated, are close to the expected theoretical values. This leads to consider that the execution of this code, whose duration depends on the power of the burner, is able to obtain values close to those that can be collected in a real boiler with the same dimensions and under the same conditions.



# Índice general

<b>Lista de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Fundamentación teórica</b>	<b>3</b>
2.1. Principios termodinámicos . . . . .	3
2.1.1. Vaporización . . . . .	3
2.1.2. Equilibrio evaporativo . . . . .	3
2.1.3. Ebullición . . . . .	4
2.2. Procesos termodinámicos en calderas de vapor . . . . .	4
2.2.1. Vapor saturado . . . . .	4
2.2.2. Gas ideal . . . . .	5
2.2.3. Gas real . . . . .	5
2.2.4. Vapor flash . . . . .	6
<b>3. Cálculo de las variables termodinámicas simuladas</b>	<b>7</b>
3.1. Interpolación de variables . . . . .	7
3.2. Cálculo de energía neta . . . . .	7
3.3. Cálculo de la energía requerida para el calentamiento a la temperatura de saturación	8
3.4. Cálculo de la energía sobrante . . . . .	8
3.5. Cálculo de incremento de temperatura . . . . .	9
3.5.1. Cálculo de la temperatura intermedia . . . . .	9
3.5.2. Incremento de temperatura por aporte de energía . . . . .	9
3.5.3. Variación de temperatura por caída de presión . . . . .	10
3.6. Cálculo de generación de vapor . . . . .	10
3.6.1. Generación de vapor por aporte energético . . . . .	10
3.6.2. Generación de vapor flash . . . . .	10
3.7. Cálculo de incremento de presión . . . . .	11
3.7.1. Cálculo de la presión de vapor generado . . . . .	12
3.7.2. Cálculo de volumen de vapor . . . . .	12
3.7.3. Cálculo de n moles . . . . .	12
3.8. Cálculo de volumen de agua . . . . .	12
3.8.1. Cálculo de incremento de volumen de vapor generado . . . . .	13

---

<b>4. Algoritmo de cálculo</b>	<b>15</b>
4.1. Hardware y lenguaje empleado . . . . .	15
4.2. Diagrama de conexiones del simulador . . . . .	16
4.3. Desarrollo del Software . . . . .	18
4.3.1. Diagrama de flujo . . . . .	18
4.3.2. Código . . . . .	20
<b>5. Resultados</b>	<b>25</b>
5.1. Errores en la programación . . . . .	25
5.2. Datos obtenidos en la simulación . . . . .	26
5.2.1. Posición del quemador al 100 % . . . . .	26
5.2.2. Posición del quemador al 76 % . . . . .	29
5.2.3. Posición del quemador al 49.8 % . . . . .	31
<b>6. Discusión y conclusión</b>	<b>35</b>
6.1. Comprobación del correcto funcionamiento del simulador . . . . .	35
6.2. Conclusión . . . . .	35
<b>Bibliografía</b>	<b>36</b>
<b>Anexos</b>	<b>41</b>
<b>A. Tablas de búsqueda</b>	<b>41</b>
<b>B. Código fuente</b>	<b>43</b>



# Índice de figuras

2.1. Proceso de vaporización. . . . .	3
2.2. Equilibrio evaporativo. . . . .	4
2.3. Diagrama P-V del agua. . . . .	4
3.1. Incremento de presión. . . . .	11
3.2. Incremento de volumen. . . . .	12
4.1. Arduino Mega 2560[2]. . . . .	15
4.2. Entradas y salidas Arduino Mega 2560[2]. . . . .	16
4.3. Diagrama de conexiones del simulador. . . . .	18
4.4. Simulador. . . . .	18
4.5. Diagrama de flujo. . . . .	19
5.1. Potencia del quemador. . . . .	26
5.2. Energía neta. . . . .	27
5.3. Energía de evaporación. . . . .	27
5.4. Calor latente. . . . .	27
5.5. Masa de vapor generado. . . . .	28
5.6. Aumento de temperatura. . . . .	28
5.7. Masa de vapor generado. . . . .	28
5.8. Potencia del quemador. . . . .	29
5.9. Energía neta. . . . .	29
5.10. Energía de evaporación. . . . .	30
5.11. Calor latente. . . . .	30
5.12. Masa de vapor generado. . . . .	30
5.13. Aumento de temperatura. . . . .	31
5.14. Masa de vapor generado. . . . .	31
5.15. Potencia del quemador. . . . .	32
5.16. Energía neta. . . . .	32
5.17. Energía de evaporación. . . . .	32
5.18. Calor latente. . . . .	33
5.19. Masa de vapor generado. . . . .	33
5.20. Aumento de temperatura. . . . .	33
5.21. Masa de vapor generado. . . . .	34



# Índice de tablas

2.1. Constantes de Van der Waals. . . . .	6
6.1. Comprobación del funcionamiento del simulador. . . . .	35



# Simbología

P	Presión.
T	Temperatura.
$H_L$	Entalpía de líquido saturado.
$H_G$	Entalpía de vapor saturado.
$H_{vap}$	Entalpía de evaporización.
Q	Energía aportado miente el calor.
m	Masa del fluido.
$c_e$	Calor específico del fluido.
$\Delta T$	Salto térmico existente.
V	Volumen.
n	Número de moles.
R	Número de Avogadro.
Z	Factor de compresibilidad.
$E_N$	Energía neta.
$P_c$	Potencia calorífica.
$P_c$	Potencia pérdidas.
$E_C$	Energía requerida para el calentamiento a la temperatura de saturación.
$m_a$	La masa del fluido.
$c_e$	Calor específico del agua.
$T_s$	Temperatura de saturación.
$m_{cal}$	La masa de agua en la caldera.
$C_{e_{cal}}$	El calor específico del agua de la caldera.
$m_{al}$	La masa de agua de alimentación.
$C_{e_{al}}$	El calor específico del agua de alimentación.
$T_{al}$	La temperatura del agua de alimentación.
$T_f$	La temperatura de la caldera tras el aporte de energía.
$T_i$	La temperatura intermedia.
$v_f$	Vapor flash generado.
$H_n$	Entalpía específica del líquido del ciclo actual.
$H_b$	Entalpía específica del líquido del ciclo anterior.
L	Calor latente.
$P_a$	Presión en la caldera en el momento de la operación.
$P_v$	Presión generada por la generación de vapor.
a	Constante experimental relacionada con las atracciones moleculares.
b	Constante relacionada con el volumen molecular.
$V_a$	Volumen de la caldera antes de la generación de vapor.
$V_v$	Variación del volumen causado por la generación de vapor.
$m_v$	Masa de la caldera antes de la generación de vapor.
$\rho$	Densidad del agua en estado líquido.
PWN	Modulación de onda por pulsos.
ICSP	Programación serial en circuito.
USB	Bus de Serie Universal
SRAM	Memoria estática de acceso aleatorio.
EEPROM	Memoria de sólo lectura programable y borrable eléctricamente.
IDE	Entorno de Desarrollo Interactivo.
I2C	Circuito integrado.



# 1 Introducción

El profesor Carlos Efrén Mora ha desarrollado un software que contiene las distintas ecuaciones con las que se puede simular tanto los distintos componentes que componen una caldera de vapor saturado como las variaciones que se producen durante la simulación.

De los componentes simulados, se destacan:

- La de un quemador modulado, es decir, es capaz de suministrar diferentes tipos de potencia, la cual es calculada a partir de una curva de rendimiento obtenida de la información técnica de un quemador modulado existente en el mercado.
- El circuito de agua de alimentación, compuesto por una bomba, que es capaz de contrarrestar la presión generada por el aumento de presión de la caldera y una válvula de mariposa con la que se controla dicho circuito.

De las variaciones originadas durante la simulación se puede resaltar:

- Variación del volumen de agua al introducir agua de alimentación.
- Recálculo de la altura del agua tras la variación del volumen.
- La generación de alarmas en caso de que distintos valores, como es el nivel de agua o la presión generada, se igualarán o superarán los valores máximos y mínimos establecidos.

Aunque dicho código tiene en consideración los distintos componentes necesarios y las variaciones de comportamiento en una caldera de vapor saturado, no se han establecido las ecuaciones necesarias para realizar la simulación del aumento de temperatura ni la generación de vapor.

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo del algoritmo necesario para la simulación del aumento de temperatura y la generación de vapor para una caldera de vapor saturado, para posteriormente integrarlo al código realizado por el profesor. En esta ocasión, debido a la escasez de tiempo, se ha considerado que no hay pérdidas de energía, por lo que el algoritmo desarrollará una simulación de una caldera de vapor saturado ideal.

Para el cálculo de la temperatura se ha tenido en consideración la variación de la misma que se produce tanto por la introducción de agua de alimentación como por el aporte energético. De este modo, el cálculo se realiza en dos etapas: en la primera etapa se calcula el nuevo valor de temperatura que queda en la caldera por la introducción de agua de alimentación; en la segunda se computa la temperatura por el aporte energético.

En el cálculo de la generación de vapor saturado se ha tenido en cuenta el vapor producido por el aporte energético y por el vapor flash resultante de la apertura de la línea principal. Para la generación de vapor por aporte energético, se utiliza la energía sobrante tras el cálculo del aumento de temperatura. En cuanto a la generación de vapor flash, debido al desconocimiento de la velocidad de evaporación del agua por la variación de la presión, se ha supuesto que la variación de presión por la apertura de la línea principal es tan pequeña en cada ciclo, que la evaporación se produce instantáneamente. Con este supuesto, el cálculo se realiza dividiendo la diferencia entre la entalpía del agua del ciclo anterior y la entalpía del ciclo actual más el aporte energético, por el calor latente del ciclo actual. Por último, multiplicando ese resultado por la masa de agua se obtiene el vapor total generado.

La caldera que se ha utilizado como ejemplo tiene las siguientes características:

- Modelo → UMISA SMS-25.
- Producción de vapor máxima: → 10000 kg/h.
- Potencia máxima → 6563 kW.

El trabajo se divide en 6 capítulos.

- Capítulo 1, Introducción. Se da una breve explicación sobre el proyecto.
- Capítulo 2, Fundamentación teórica. Se describe la fundamentación teórica que sustenta este trabajo.
- Capítulo 3, Cálculo de las variables termodinámicas simuladas. Se desarrollan las distintas ecuaciones que se han utilizado.
- Capítulo 4, Algoritmo de cálculo. Se explica el hardware utilizado así como el código realizado.
- Capítulo 5, Resultados. Se observa los distintos resultados obtenidos en la visualización.
- Capítulo 6, Discusión y conclusión. Dedicado a la verificación de los resultados obtenidos y a las conclusiones.



## 2 Fundamentación teórica

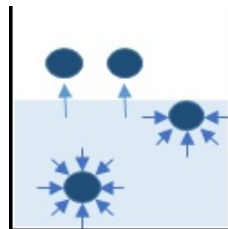
En muchos sectores el agua se utiliza como fluido de trabajo. La razón por la que se utiliza es:

1. Disponibilidad → Las tres-cuartas partes de nuestro planeta está cubierto por agua, por lo que es una fuente inagotable.
2. Economía de producción → Se puede obtener el agua a partir de los distintos sistemas de desalación, como por, el de evaporación, los cuales trabajan a partir de calor residual, que suele ser un excedente abundante tanto en buques como en centrales térmicas.
3. Propiedades físico-químicas → Como el calor específico, sus valores altos hacen que el agua sea un excelente acumulador de energía[23].

### 2.1 Principios termodinámicos

#### 2.1.1 Vaporización

Las partículas de un líquido, al estar rodeadas por las otras partículas, son atraídas en todas las direcciones debido a las fuerzas intermoleculares. A pesar de estas fuerzas, las partículas conservan bastante movilidad, pudiéndose desplazar en cualquier dirección y a velocidades distintas. En el caso de que alguna de las partículas de la superficie, donde las partículas no están siendo atraídas en todas las direcciones, consiga una velocidad suficiente para superar la fuerza de atracción, podrá saltar al espacio por encima del líquido, es decir, esa partícula se habrá vaporizado. Cabe destacar que aunque algunas de las partículas en el interior del líquido tengan suficiente energía para cambiar de estado, este suceso es imposible ya que cuando se crea la burbuja de vapor, esta se romperá rápidamente debido a que la presión en el interior de la burbuja es inferior a la ejercida por el exterior. Debido a que la energía cinética de una molécula es proporcional a su temperatura, la evaporación se produce más rápido cuanto más alta sea la temperatura. Cuando se vaporizan algunas partículas, las restantes poseen una energía cinética inferior, lo que provoca que la temperatura del agua disminuya [9, 7, 11, 8].



**Figura 2.1:** Proceso de vaporización.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.1.2 Equilibrio evaporativo

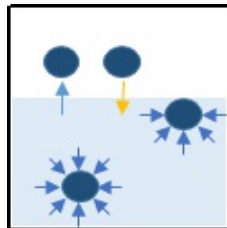
En un recinto cerrado, las partículas que pasan al estado de vapor quedan confinadas en un espacio limitado, por lo que se van acumulando. Cuando alguna de estas partículas choca con la superficie del agua, se incorpora nuevamente al líquido.

Cuando las partículas que se vaporizan sean las mismas que las que se condensan, se considera que el sistema se encuentra en equilibrio. En este estado, se dice que el vapor está “saturado” y ya no se dará ningún cambio adicional en la presión o en la densidad del mismo.

Para un sistema que consiste en vapor y líquido de una sustancia pura, este estado de equilibrio está directamente relacionado con la presión de vapor de la sustancia, como viene expresado en la relación de Clausius-Clapeyron:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{\Delta H_{vap}}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.1)$$

Donde  $P_1$  y  $P_2$  son las presiones de vapor a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  respectivamente,  $\Delta H_{vap}$  es la entalpía de la vaporización, y  $R$  es la constante universal de los gases [9, 7, 11, 8].



**Figura 2.2:** Equilibrio evaporativo.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.3 Ebullición

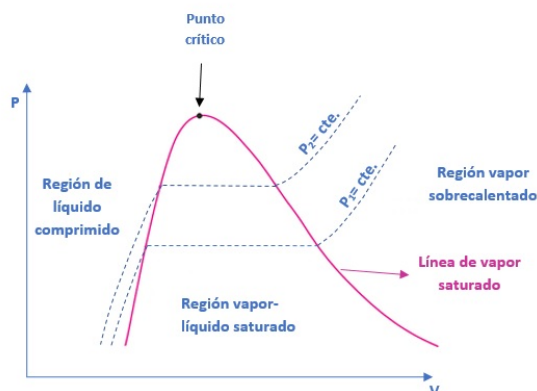
Cuando a una sustancia, se le aplica energía mediante calor, irá aumentando su temperatura. Cuando el calor aplicado sea igual al calor latente, la presión de vapor dentro del líquido será igual a la presión exterior, posibilitando la formación de partículas de vapor en toda la masa de la sustancia y no solo en la superficie, provocando que hierva y cambie de estado [9, 7, 11, 8].

## 2.2 Procesos termodinámicos en calderas de vapor

### 2.2.1 Vapor saturado

Como anteriormente se ha explicado en el apartado 2.1, el vapor saturado es aquel que se encuentra en un sistema en equilibrio. Este vapor se establece a temperatura y presiones donde el gas y el líquido pueden trabajar juntos [9, 32, 8].

En la figura se puede apreciar la línea de saturación:



**Figura 2.3:** Diagrama P-V del agua.

Fuente: Elaboración propia a partir de [http://laplace.us.es/wiki/index.php/F%C3%ADsica\\_I\\_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/F%C3%ADsica_I_(GIE))

## 2.2.2 Gas ideal

Un gas ideal es un gas perfecto, compuesto por partículas con movimientos aleatorios que no interactúan entre sí. En condiciones normales de presión y temperatura, la mayoría de los gases se comportan de forma cualitativa como un gas ideal. Muchos gases tales como el aire, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, los gases nobles y algunos gases pesados como el dióxido de carbono pueden ser tratados como gases ideales dentro de una tolerancia razonable [9, 30, 32, 31, 22].

Las leyes del gas perfecto son:

1. La ley de Boyle-Mariotte → Para el proceso isotérmico el producto de la presión de un gas por el volumen del mismo es una magnitud constante:

$$pV = \text{constante} \quad (2.2)$$

El escribir la ecuación para dos estados arbitrarios obtendremos la relación de los parámetros de un gas ideal:

$$p_1V_1 = p_2V_2 \quad (2.3)$$

2. La ley de Gay-Lussac → Para el proceso isobárico (a presión constante) el volumen de un gas es proporcional a la temperatura absoluta del mismo:

$$\frac{V}{T} = \text{constante} \quad (2.4)$$

El escribir la ecuación para dos estados arbitrarios se obtendrá la relación de los parámetros de un gas ideal:

$$\frac{V}{T} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2.5)$$

3. La ley de Avogadro → En volúmenes iguales de gases perfectos diferentes que se encuentran a una misma temperatura y presión, hay igual número de moléculas.

$$\begin{aligned} V &= \text{constante} \\ n &= \text{constante} \end{aligned} \quad (2.6)$$

De la unión matemática de todas estas leyes se obtiene la ecuación general de los gases ideales:

$$PV = nRT \quad (2.7)$$

Donde,

- P → Presión.
- V → Volumen.
- n → Número de moles.
- R → Número de Avogadro.
- T → Temperatura.

## 2.2.3 Gas real

Los gases reales se desvían del comportamiento ideal porque las moléculas reales tienen un volumen no siempre despreciable y porque se atraen entre sí. Es imposible no tener en consideración las atracciones moleculares cuando estas se mueven lentamente, es decir, a bajas temperaturas.

Cuando los gases se comprimen, los volúmenes moleculares aumentan su importancia. Por ello los gases se aproximan más al comportamiento ideal a temperaturas altas y presiones bajas.

Por otro lado, a ciertas temperaturas bajas y alta presión, los gases reales sufren un cambio de estado. Este cambio no se describe en el modelo de gas ideal [9, 30, 32, 31, 10, 6].

### 2.2.3.1 Ecuación de Van der Waals

En 1873, Van der Waals introdujo correcciones en la ecuación de gas real para incluir los efectos del volumen propio de las moléculas y de la menor fuerza de choque.

Para  $n$  moles, la ecuación de Van der Waals es:

$$\left[P + \frac{an^2}{V^2}\right](V - nb) = nRT \quad (2.8)$$

Donde  $a$  es una constante experimental relacionada con las atracciones moleculares y  $b$  es una constante relacionada con el volumen molecular [9, 10, 12, 18].

Gas	Hg	He	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
a ( $l^2atmmol^{-2}$ )	8,09	0,0341	0,2444	5,464	1,360	1,390	3,592
b ( $cm^3mol^{-1}$ )	17,0	23,70	26,61	30,49	31,83	39,13	42,67

**Tabla 2.1:** Constantes de Van der Waals.

Fuente: <http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QG.htm>

### 2.2.4 Vapor flash

El vapor flash se puede definir como aquel que se genera a partir del líquido condensado por la reducción de la presión. Este vapor solo puede producirse en un recinto cerrado.

Cuando se aporta energía mediante calor a un recipiente cerrado produce un aumento progresivo de la temperatura del agua. Una vez que la temperatura llega al punto de ebullición, una parte del agua se evaporará, ocupando el espacio libre del recipiente. A medida que transcurre el tiempo, el vapor ejercerá una nueva presión sobre el líquido, provocando que la temperatura de ebullición se eleve. Si ese recipiente se abriera, la presión interna sería superior a la externa, por lo que el vapor acumulado saldría al exterior, disminuyendo la presión que ejercía sobre el agua. El líquido, el cual ha ido aumentando progresivamente su temperatura de ebullición a causa de la presión existente, ve disminuida dicha presión, debido a esto, su nueva temperatura de ebullición es inferior a su temperatura actual, provocando que el agua libere de manera inmediata ese exceso de energía, dando como resultado la evaporación de una parte del agua [5, 4].

# 3 Cálculo de las variables termodinámicas simuladas

## 3.1 Interpolación de variables

El agua va variando sus distintas propiedades a medida que va aumentando la presión, como es su temperatura de saturación, su densidad o la energía necesaria para el cambio de estado. Estos datos se encuentran recogidas en distintas tablas de vapor.

El programa, partiendo de la presión que posee la caldera en ese momento, recoge los valores de las distintas variables para posteriormente utilizarlas. Cuando la presión que presenta la caldera es un valor que no está establecido en la tabla, el programa debe realizar una interpolación. Cabe destacar que el programa ejecutará una interpolación por cada variable.

La interpolación que utiliza el programa es una interpolación lineal, que a partir de dos valores dados, en este caso, los valores superior e inferior más cercanos al valor de la presión.

$$\frac{y - y_0}{y_1 - Y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (3.1)$$

En la ecuación anterior, la única variable desconocida es el valor  $y$ . Si se toma como ejemplo que se quiere calcular la temperatura de saturación para la presión actual de la caldera, siendo 1,35 bar, el programa buscará en la tabla los valores inferior y superior más próximos, tanto de la presión como de la temperatura de saturación. En este caso, la presión inferior y superior son 1,3 y 1,4 bar respectivamente, mientras que la de la temperatura de saturación son 107,109 y 109,292°C. Con estos valores y utilizando la ecuación 3.1, se tiene:

$$\frac{y - 1,3}{109,292 - 107,109} = \frac{1,35 - 1,3}{1,4 - 1,3} \quad (3.2)$$

Despejando se obtiene que la temperatura de saturación para esa presión es:

$$y = (107,109 + 1,35 - 1,3) \frac{109,292 - 107,109}{1,4 - 1,3} = 108,32C \quad (3.3)$$

## 3.2 Cálculo de energía neta

Para poder generar vapor o simplemente calentar el agua, se debe aplicar una determinada energía. Esta energía se obtiene a partir del calor suministrado por el quemador.

Para poder conocer la energía aportada por el quemador, se parte de la potencia calorífica del quemador, donde:

$$P_c = \frac{\text{Energía calorífica generada}}{\text{unidad de tiempo}} \quad (3.4)$$

Despejando, se obtiene:

$$\text{Energía calorífica generada} = P_c \text{ tiempo} \quad (3.5)$$

En la simulación, el tiempo viene determinado por la velocidad que tarda el programa en realizar un bucle, denominándola  $dt$ .

Además de calcular la energía suministrada por el quemador, se tiene que considerar que el sistema puede tener pérdidas de energía. Por tanto, la ecuación de la energía total o energía neta disponible es:

$$E_N = (P_c - P_p) dt \quad (3.6)$$

Donde  $P_p$  es la cantidad de energía que se pierde en nuestro sistema.

### 3.3 Cálculo de la energía requerida para el calentamiento a la temperatura de saturación

Durante la simulación, cabe la posibilidad de que la energía neta disponible sea superior a la energía necesaria para generar vapor, por lo que el sistema sería capaz tanto de calentar como de evaporar. Para poder conocer la energía necesaria para calentar, se aplica la siguiente ecuación:

$$Q = m * c_e * \Delta T \quad (3.7)$$

Donde,

- $Q$  → Energía aportado mediante el calor (kJ).
- $m$  → Masa del fluido (kg).
- $c_e$  → Calor específico del fluido (kJ/kgK).
- $\Delta T$  → Salto térmico existente (°C).

En este caso, el salto de temperatura existente es la diferencia entre la temperatura de saturación, correspondiente a la presión existente en la caldera, y la temperatura actual. La ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$E_C = m_a c_e (T_s - T) \quad (3.8)$$

Donde,

- $E_C$  → Energía requerida para el calentamiento a la temperatura de saturación (kJ).
- $m_a$  → La masa del fluido (kg).
- $c_e$  → Calor específico del agua, cálculo a partir de la presión que se encuentre la caldera en el momento del cálculo (kJ/kgK).
- $T_s$  → Temperatura de saturación a la presión que se encuentre la caldera en el momento del cálculo (K).
- $T$  → Temperatura a la que se encuentra la caldera en el momento del cálculo (K).

### 3.4 Cálculo de la energía sobrante

Para calcular la energía que dispone el sistema para generar vapor, una vez que se ha aumentado la temperatura de la caldera hasta la temperatura de saturación, simplemente hay que resolver la siguiente ecuación:

$$E_S = E_N - E_C \quad (3.9)$$

### 3.5 Cálculo de incremento de temperatura

Para poder calcular la temperatura, se debe recordar que el incremento se produce por aporte de energía por un lado, y por generación de vapor flash, por otro. Aunque ambos cálculos son distintos, tienen en común la temperatura intermedia con los que se realizan dichos cálculos.

#### 3.5.1 Cálculo de la temperatura intermedia

La temperatura dentro de la caldera y la temperatura del agua de alimentación (40°C) son distintas, por eso, cuando se introduce una cierta cantidad de agua de alimentación, la temperatura de la caldera sufre un descenso. En este caso, el agua del interior de la caldera cede cierta cantidad de energía al agua de alimentación introducida. Para calcular la temperatura intermedia, se utiliza la ecuación 3.7. En el caso del agua de la caldera que cede energía:

$$Q_1 = m_{\text{cal}} C_{e_{\text{cal}}} (T_{\text{cal}} - T_i) \quad (3.10)$$

En el caso del agua de alimentación, que absorbe energía:

$$Q_2 = m_{\text{al}} C_{e_{\text{al}}} (T_i - T_{\text{al}}) \quad (3.11)$$

Como se está considerando que la caldera no tiene pérdidas debidas al aislamiento, la energía que va a ceder el agua de la caldera será la misma energía que absorba el agua de alimentación, por tanto,  $Q_{\text{cal}} = Q_{\text{al}}$ :

$$m_{\text{cal}} C_{e_{\text{cal}}} (T_{\text{cal}} - T_i) = m_{\text{al}} C_{e_{\text{al}}} (T_i - T_{\text{al}}) \quad (3.12)$$

Despejando, se obtiene la ecuación de la temperatura intermedia:

$$T_i = \frac{m_{\text{cal}} C_{e_{\text{cal}}} T_{\text{cal}} + m_{\text{al}} C_{e_{\text{al}}} T_{\text{al}}}{m_{\text{al}} C_{e_{\text{al}}} + m_{\text{cal}} C_{e_{\text{cal}}}} \quad (3.13)$$

Donde,

- $m_{\text{cal}}$  → La masa de agua en la caldera (kg).
- $C_{e_{\text{cal}}}$  → El calor específico del agua de la caldera (kJ/kgK).
- $T_{\text{cal}}$  → La temperatura a la que se encuentra la caldera en el momento del cálculo (K).
- $m_{\text{al}}$  → La masa de agua de alimentación (kg).
- $C_{e_{\text{al}}}$  → El calor específico del agua de alimentación (kJ/kgK).
- $T_{\text{al}}$  → La temperatura a la que se encuentra el agua de alimentación (K).

#### 3.5.2 Incremento de temperatura por aporte de energía

Se calcula el incremento de temperatura del agua debido al aporte energético a través del quemador. Para ello, se utiliza la ecuación 3.7, en la cual  $Q = E_N$ :

$$E_N = m_a c_e (T_f - T_i) \quad (3.14)$$

$$T_f = T_i + \frac{E_N}{m_a c_e} \quad (3.15)$$

Donde,

- $T_f$  → La temperatura de la caldera tras el aporte de energía (K).
- $T_i$  → La temperatura intermedia (K).
- $E_N$  → La energía aportada por el quemador (kJ).
- $m_a$  → La masa de agua existente en la caldera (kg).
- $c_e$  → El calor específico del agua de la caldera (kJ/kgK).

### 3.5.3 Variación de temperatura por caída de presión

En este incremento no se tiene en cuenta el aporte energético del quemador, ya que éste se ha utilizado para la generación de vapor flash. Por otro lado, la variación de temperatura, causada por la generación de vapor, es negativa. Debido a que el vapor se ha generado con la energía acumulada en el agua, se tiene que usar esa misma energía para calcular la nueva temperatura de la caldera, es decir,  $Q = (H_n - H_b)$ .

El cálculo de esta nueva temperatura se obtiene con la siguiente ecuación:

$$(H_n - H_b) = m c_e (T_f - T_i) \quad (3.16)$$

Despejando,

$$T_f = T_i + \frac{H_n - H_b}{m c_e} \quad (3.17)$$

El resultado obtenido es la variación de temperatura por cada kg de vapor generado. Para obtener la temperatura final debe multiplicarse por la masa de vapor generada:

$$T_f = T_i + \left( \frac{H_n - H_b}{m_a c_e} m_v \right) \quad (3.18)$$

Cabe destacar que el valor de la diferencia de entalpías será un valor negativo, ya que dicha energía acumulada se ha utilizado anteriormente para generar vapor, lo que implica un descenso de la temperatura.

## 3.6 Cálculo de generación de vapor

### 3.6.1 Generación de vapor por aporte energético

Cuando se esta aportando energía al sistema, el cálculo se estima utilizando el valor resultante de la ecuación 3.9 y el calor latente. La ecuación resultante es la siguiente:

$$\Delta m_v = \frac{E_S}{L} \quad (3.19)$$

Donde,

- $E_S \rightarrow$  Energía sobrante para la generación de vapor (kJ).
- $L \rightarrow$  Calor latente (kJ/kg).

Destacar que el valor del calor latente depende de la presión a la que se encuentre la caldera.

### 3.6.2 Generación de vapor flash

Al desconocer la velocidad de evaporación del agua, consideramos que la caída de presión que se produce en cada ciclo de nuestra simulación, es tan pequeña, que la producción de vapor flash es inmediata. De esta manera, la ecuación para el cálculo de vapor flash sería:

$$\Delta v_f = \frac{H_b - H_n}{L} \quad (3.20)$$

Donde,

- $v_f \rightarrow$  Vapor flash generado (kg vapor flash/kg agua condensada).
- $H_n \rightarrow$  Entalpía específica del líquido a la presión del ciclo actual (kJ/kg).
- $H_b \rightarrow$  Entalpía específica del líquido a la presión del ciclo anterior (kJ/kg).



- $L \rightarrow$  Calor latente (kJ/kg).

Aunque se produzca el vapor flash por cambio de presión, el quemador puede estar encendido y seguir aportando energía, por lo que se debe incluir el aporte de energía del quemador a la ecuación anterior.

Como la energía que aporta el quemador es una energía total, se debe conocer dicha energía con respecto a la cantidad de agua existente en la caldera.

Con lo anterior, la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$\Delta v_f = \frac{H_b - H_n + \frac{E_N}{m_a c_e}}{L} \quad (3.21)$$

Donde,

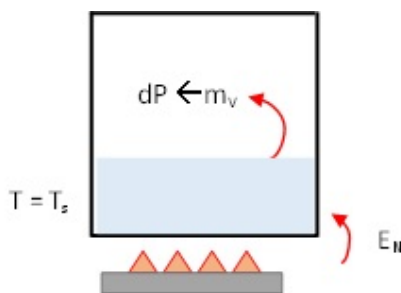
- $v_f \rightarrow$  Vapor flash generado (kg vapor flash/kg agua condensada).
- $H_n \rightarrow$  Entalpía específica del líquido a la presión del ciclo actual (kJ/kg).
- $H_b \rightarrow$  Entalpía específica del líquido a la presión del ciclo anterior (kJ/kg).
- $E_N \rightarrow$  Energía neta generada por el quemador (kJ).
- $m_a \rightarrow$  La masa del fluido (kg).
- $c_e \rightarrow$  Calor específico del agua, (kJ/kgK).
- $L \rightarrow$  Calor latente (kJ/kg).

Actualmente se tiene el vapor flash generado con respecto al agua disponible en la caldera. Para obtener la cantidad exacta de vapor generado, debe multiplicarse el resultado anterior por la masa de agua de la caldera, quedando como ecuación final:

$$\Delta v_f = \left( \frac{H_b - H_n + \frac{E_N}{m_a c_e}}{L} \right) m_a \quad (3.22)$$

### 3.7 Cálculo de incremento de presión

Como se está aplicando energía al fluido mediante calor, llegará un momento en que esta temperatura sea la misma que la temperatura de saturación, provocando que una parte del fluido cambie de estado.



**Figura 3.1:** Incremento de presión.

**Fuente:** Elaboración propia.

A su vez, esa masa evaporada provoca una variación de la presión, la cual, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta P = P_a + P_v \quad (3.23)$$

Donde,

- $P_a \rightarrow$  Presión en la caldera en el momento de la operación (bar).
- $P_v \rightarrow$  Presión generada por la generación de vapor (bar).

### 3.7.1 Cálculo de la presión de vapor generado

Como se debe considerar que el vapor de agua se comporta como un gas real, debido principalmente a que un gas ideal no puede variar su estado, aunque se enfríe. Un gas real, como el vapor de agua, varía su estado al enfriarlo.

Por tanto, para calcular esa diferencia de presión debemos utilizar la ecuación 2.8. Despejando, obtenemos la ecuación que calcula la presión debido a la generación de vapor.

$$P_v = \frac{nRT}{(V - nb)} - \frac{an^2}{V^2} \quad (3.24)$$

Donde,

- $P_v$  → Presión debido al vapor generado (bar).
- $V$  → Volumen de vapor ( $m^3$ ).
- $n$  → Número de moles (mol).
- $R$  → Número de Avogadro (atm.l)/K.mol).
- $T$  → Temperatura (K).
- $a$  → Constante experimental relacionada con las atracciones moleculares ( $l^2 atm mol^{-2}$ ).
- $b$  → Constante relacionada con el volumen molecular ( $cm^3 mol^{-1}$ ).

### 3.7.2 Cálculo de volumen de vapor

El volumen que va a ocupar el vapor que nosotros generado es el espacio sobrante en el interior de la caldera, es decir, el espacio que no esta ocupando el agua. Para calcular dicho espacio, simplemente hay que restar al volumen total de la caldera, el volumen que esta ocupando el agua:

$$V = V_T - V_a \quad (3.25)$$

### 3.7.3 Cálculo de n moles

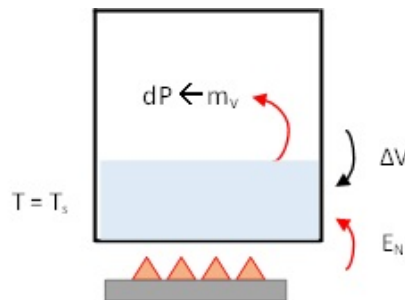
El número de moles que hay en 1 gr de agua es 18 moles, por lo que para saber la cantidad de moles, se realizará la siguiente operación.

$$n = m_v \cdot 1000 \frac{1 \text{ gr de } H_2O}{18 \text{ moles}} \quad (3.26)$$

Donde  $m_v$  → Masa de vapor generado (kg).

## 3.8 Cálculo de volumen de agua

Con el volumen pasa lo mismo que con la presión.



**Figura 3.2:** Incremento de volumen.  
Fuente: Elaboración propia.

Cuando se genera vapor, se produce una variación en el volumen de agua que hay en la caldera. Esta variación se calcula de la siguiente manera:

$$V = V_a + \Delta V_v \quad (3.27)$$

Donde,

- $V_a \rightarrow$  Volumen de la caldera antes de la generación de vapor ( $m^3$ ).
- $V_v \rightarrow$  Incremento de volumen causado por la generación de vapor ( $m^3$ ).

### 3.8.1 Cálculo de incremento de volumen de vapor generado

Atendiendo a la ecuación del volumen:

$$\Delta V = m \rho \quad (3.28)$$

En este caso, la cantidad de masa de vapor que se ha generado es la misma cantidad de agua que anteriormente formaba parte del volumen total de la caldera, por tanto:

$$\Delta V_v = m_v \rho \quad (3.29)$$

Donde,

- $m_v \rightarrow$  Masa de la caldera antes de la generación de vapor ( $m^3$ ).
- $\rho \rightarrow$  Densidad del agua en estado líquido ( $kg/m^3$ ).

Destacar que la densidad utilizada es la densidad del agua en estado líquido, correspondiente a la presión a la que se encuentra la caldera, ya que la masa de vapor generada es la misma cantidad de masa de agua que se ha perdido en el volumen de agua de la caldera.



# 4 Algoritmo de cálculo

## 4.1 Hardware y lenguaje empleado

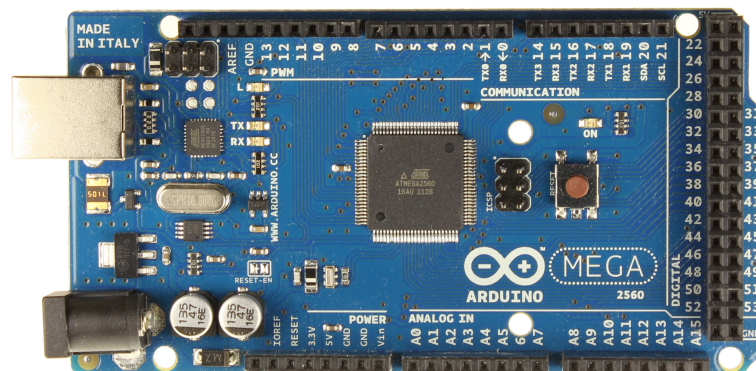
El hardware utilizado para ejecutar este código es el Arduino Mega 2560, el cual está construida con un microcontrolador ATmega2560.

Está construida para disponer de una gran variedad de entradas/salidas, de las cuales, 54 son entradas/salidas digitales, de las cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWN, 16 son entradas/salidas analógicas y 4 puestos seria. Además, dispone de un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector ICSP y un pulsador para el reset.

Esta placa, debido a su estructura, es utilizada para grandes proyectos, como son las impresoras 3D, domótica y robótica[2].

Las características principales son:

- Microprocesador ATmega2560.
- Tensión de alimentación (recomendado) 7-12V.
- Integra regulación y estabilización de +5 Vcc.
- 54 líneas de Entradas/Salidas Digitales (14 de ellas se pueden utilizar como salidas PWM).
- 16 entradas analógicas.
- Máxima corriente continua para las entradas: 40 mA.
- Salida de alimentación a 3.3V con 50 mA.
- Memoria de programa de 256Kb (el bootloader ocupa 8Kb).
- Memoria SRAM de 8Kb para datos y variables del programa.
- Memoria EEPROM para datos y variables no volátiles.
- Velocidad del reloj de trabajo de 16MHz.
- Reducidas dimensiones de 100 x 50 mm.



**Figura 4.1:** Arduino Mega 2560[2].

**Fuente:** <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>

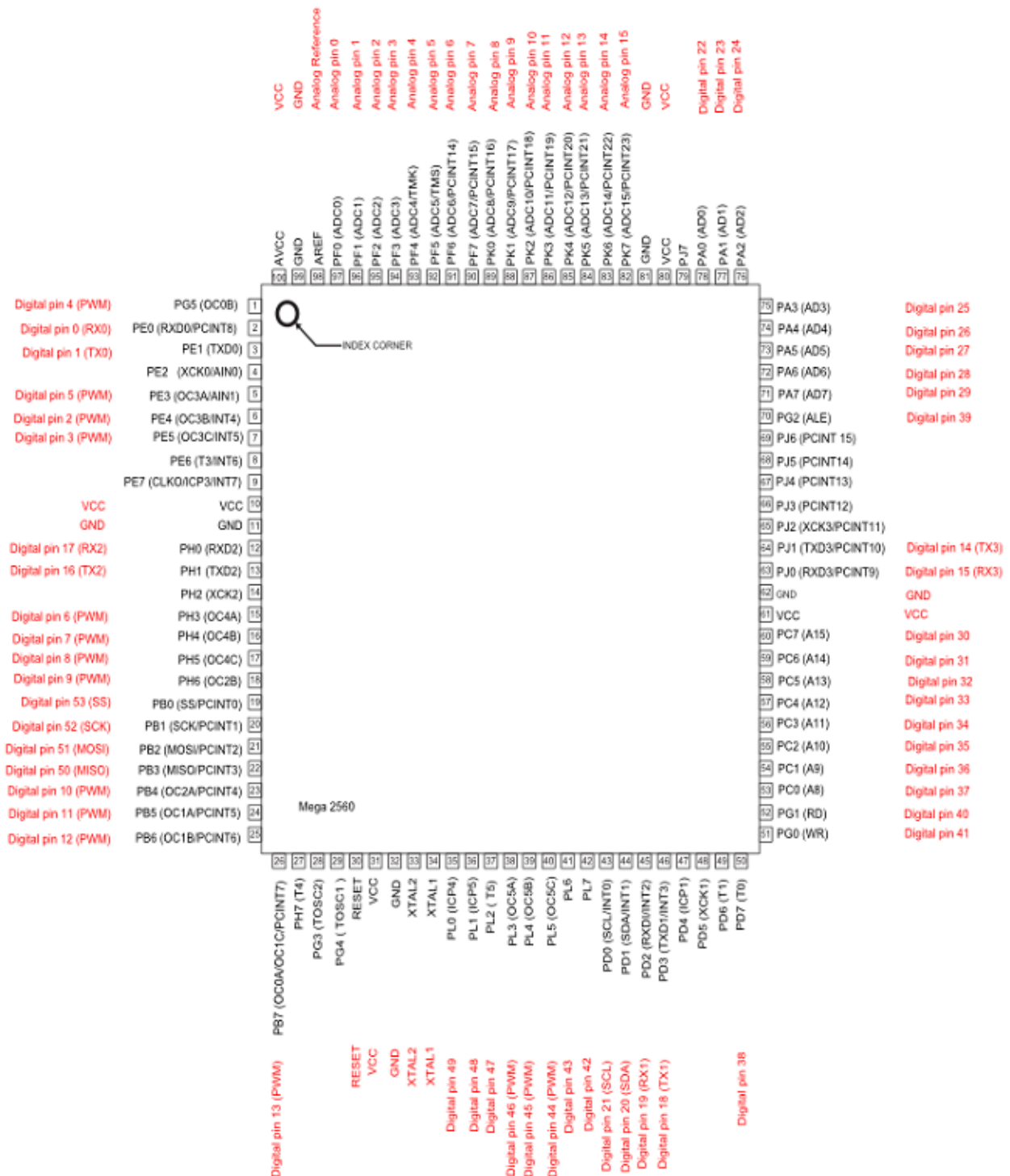


Figura 4.2: Entradas y salidas Arduino Mega 2560[2].

Fuente: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>

## 4.2 Diagrama de conexiones del simulador

Para la realización del simulador, no ha sido necesario la utilización de todas entradas/salidas de la placa.

Mediante la conexión USB, se alimenta la placa, la pantalla LCD y el resto de componentes que forman el simulador. Los LEDs utilizados son diodos bicolor, con el fin de indicar los procesos más

importantes que ocurren durante la simulación. Estos se encuentran conectados a las conexiones digitales como salidas.

- LED 1, conectado a la salida digital número 22 → Alarma por alto nivel de agua en la caldera.
- LED 1, conectado a la salida digital número 23 → El nivel de la caldera es el correcto.
- LED 2, conectado a la salida digital número 24 → Alarma por alta presión.
- LED 2, conectado a la salida digital número 25 → Presión de trabajo de la caldera.
- LED 3, conectado a la salida digital número 26 → Bloqueo de la caldera y RESET.
- LED 3, conectado a la salida digital número 27 → La caldera se encuentra operativa.
- LED 4, conectado a la salida digital número 28 → El quemador esta encendido/apagado.

Dichos LEDs trabajan con un voltaje de 2,1V y a una intensidad de 20mA, por lo que al conectarlo a la placa se le aplicaría un voltaje mayor del que necesita, provocando el deterioro de los LEDs y de los pines del microcontrolador. Para evitarlo, se coloca una resistencia, entre el pin y el LED, cuyo valor es calculado a partir de la ley de Ohm.

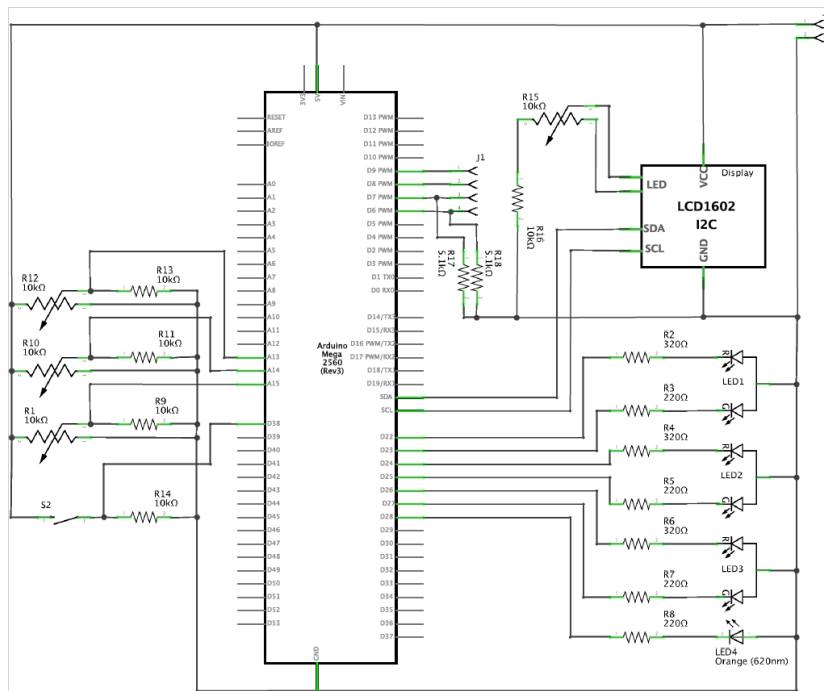
Además, mediante una conexión digital utilizada como entrada (D35), se ha colocado el reseteo del simulador, con el fin de eliminar el bloqueo de la caldera cuando se han solucionado los errores pertinentes. Asimismo, al mantenerlo pulsado durante un periodo de tiempo, se produce la variación de las variables iniciales del simulador, pudiendo simular en dos estados diferentes.

Por otro lado, se han utilizado cuatro potenciómetros, tres de ellos con el fin de modificar las variables de simulación y el último para modificar la luminosidad de la pantalla LCD. Estos se encuentran conectados a las conexiones analógicas como entradas.

- Potenciómetro R1 → Posición del quemador.
- Potenciómetro R10 → Controla la válvula de alimentación.
- Potenciómetro R12 → Regula la válvula de la línea principal.
- Potenciómetro R15 → Regula la luminosidad de la pantalla LCD.

Como los potenciómetros son resistencias variables y, a fin de evitar el deterioro de los pines de la placa, se ha colocado una resistencia conectada a la pata de salida.

La pantalla LCD se encuentra alimentada mediante el USB. La optimización de la luminosidad de la pantalla, se regula a partir de un potenciómetro. Los datos son transmitidos a partir de los pines 20 (SDA) y 21 (SLC) mediante un protocolo de comunicaciones I2C, usando librería Wire.



**Figura 4.3:** Diagrama de conexiones del simulador.

Fuente: Reproducido con el permiso del profesor Carlos Efrén Mora.



**Figura 4.4:** Simulador.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.3 Desarrollo del Software

### 4.3.1 Diagrama de flujo

En la siguiente imagen se puede apreciar los pasos que realiza el programa para simular la generación de vapor.



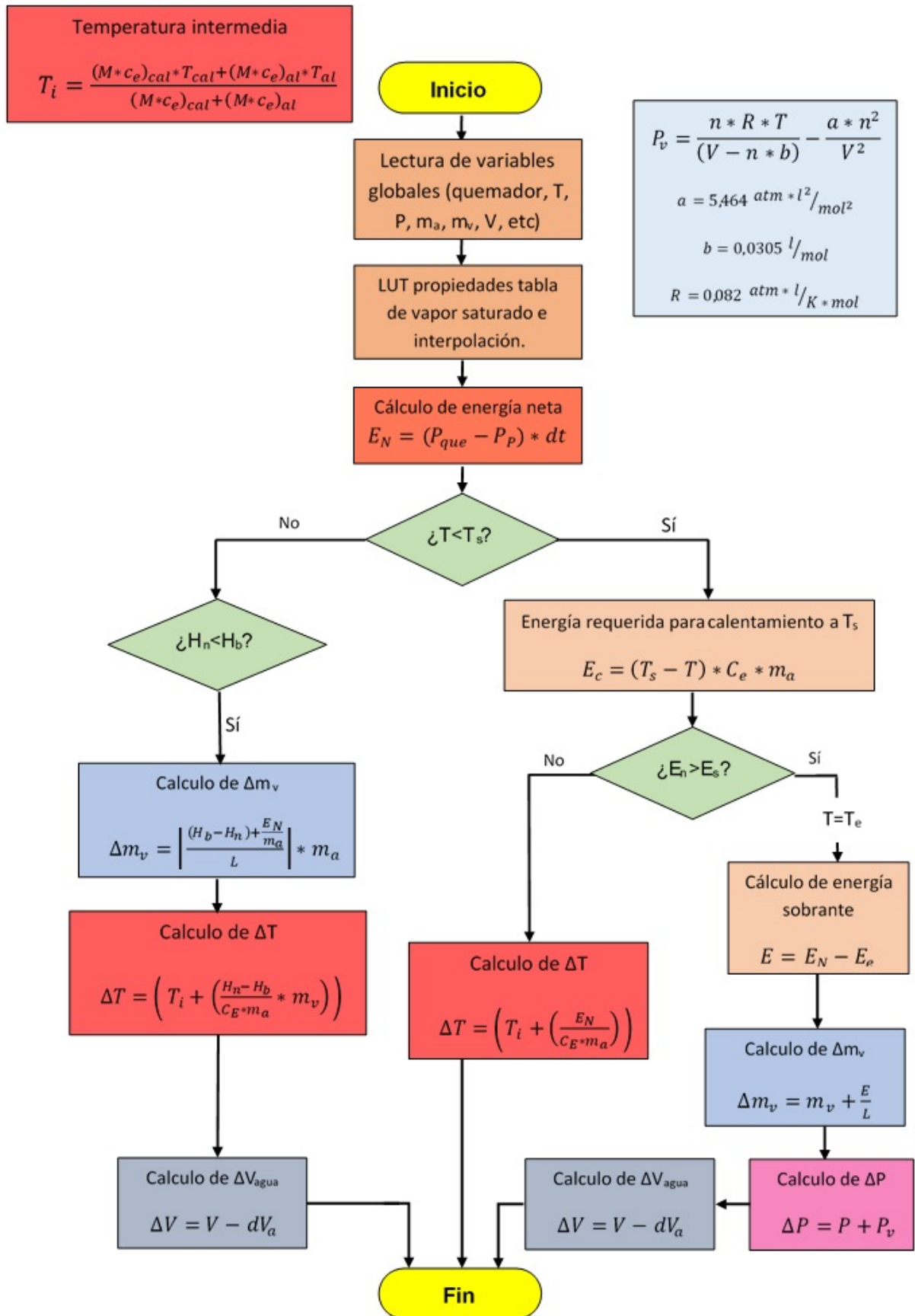


Figura 4.5: Diagrama de flujo.  
 Fuente: Elaboración propia.

## 4.3.2 Código

### 4.3.2.1 Cálculo de las variables termodinámicas

```

void calculateThermodynamicVariables(){

    H_water_b = h_water;

    //Se determinan los valores mínimos y máximos de presión para interpolar
    int i=0;
    for(i=0; i<67; i++) {
        if ((Pa[i]<SteamPressure+1) && (Pa[i+1]>SteamPressure+1)) break;
    }

    //Cálculo de las variables termodinámicas

    //El Bucle sólo se inicia cuando P>0
    if((Pa[i]<SteamPressure+1) && (Pa[i+1]>SteamPressure+1)) {

        //A la presión se le suma +1 debido a que en la tabla de búsqueda la presión
        es absoluta

        //Calcula la temperatura de saturación con respecto a la presión actual de la
        caldera en este ciclo
        T_saturate = interpolate(SteamPressure+1,Ts[i],Ts[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula la densidad del agua líquida con respecto actual actual de la caldera
        en este ciclo
        density_liquid = interpolate(SteamPressure+1,d1[i],d1[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula la densidad del vapor con respecto a la presión actual de la caldera
        en este ciclo
        density_steam = interpolate(SteamPressure+1,dv[i],dv[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula la entalpía del agua líquida con respecto a la presión actual de la
        caldera en este ciclo
        h_water = interpolate(SteamPressure+1,Hl[i],Hl[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula la entalpía del vapor con respecto a la presión actual de la caldera
        en este ciclo
        h_steam = interpolate(SteamPressure+1,Hv[i],Hv[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula el calor latente del agua líquida con respecto a la presión actual de
        la caldera en este ciclo
        L_ws = interpolate(SteamPressure+1,L[i],L[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula el calor específico del agua líquida con respecto a la presión actual
        de la caldera en este ciclo
        c_water = interpolate(SteamPressure+1,Ce[i],Ce[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);
    }

    //Calculo de masa de agua en la caldera (Kg)
    WaterMass = WaterVolume*density_liquid;

    //Calculo de la masa de agua de alimentación (kg)
    FeedWaterMass = ((WaterInletFlow/3600) * (float(t_delta)/1000.0))*FeedWaterDensity;
}

```

Se procede a guardar el dato de la entalpía del agua del ciclo anterior con otro nombre, ya que a continuación se sobrescribirá. Posteriormente, se calculan las variables termodinámicas mediante la interpolación. Para este proceso se necesita saber la posición del valor de la presión en la tabla de búsqueda, para ello se realiza un comando de búsqueda que localiza los valores de las presiones superiores e inferiores de la presión dada en la caldera en este ciclo. Para finalizar, se efectúa tanto el cálculo de la masa de agua en la caldera como de alimentación, los cuales serán necesarios más adelante.

Se realiza el cálculo de la energía neta utilizando la ecuación 3.6.

#### 4.3.2.2 Cálculo de la energía neta

```
//Se calcula la energía neta (kJ)
NetEnergy = (float(PowerTransferred)-float(LosePower))*(float(t_delta)/1000.0);

/*Serial.println ("tiempo");
Serial.println (t_delta);
Serial.println ( "potencia quemador");
Serial.println (PowerTransferred);
Serial.println ("losepower");
Serial.println (LosePower);
Serial.println("Energia neta (kJ)");
Serial.println(NetEnergy);*/

// Si la temperatura es inferior a la temperatura de saturacion con respecto a la
presión actual de la caldera en este ciclo
if (WaterTemperature<=T_saturate)
{
//Cálculo de la energía requerida para alcanzar la temperatura de saturación
} else {
//Generación de vapor flash
}
```

Se realiza el cálculo de la energía neta utilizando la ecuación 3.6. Luego se genera una condición referente a la temperatura actual de la caldera. Si esta no supera la temperatura de saturación del ciclo actual, se ejecutarán los cálculos necesarios para el cálculo de temperatura y la generación de vapor; en caso contrario, se procederá a realizar las ecuaciones pertinentes para simular la generación de vapor flash.

#### 4.3.2.3 Cálculo de la energía requerida para alcanzar la temperatura de saturación

```
//Cálculo de la energía de calentamiento a ts
if((T_saturate-WaterTemperature)<0.05) {

HeatEnergy = 0;
} else HeatEnergy = ((float(T_saturate)+273.15)-(float (WaterTemperature)+273.15))
*float (c_water)*float (WaterMass);

/*Serial.println("Energia de calentamiento a Ts (kJ)");
Serial.println(HeatEnergy);*/

if (NetEnergy>HeatEnergy)
{
//Generación de vapor por aporte energético
} else {
//Cálculo de temperatura
}
```

Aunque se ejecuta utilizando la ecuación 3.8, se debe realizar una condición a fin de evitar errores debido a los decimales resultantes de los cálculos anteriores. Seguidamente se encuentra otra condición, donde dependiendo de la energía que se disponga, se realizará el cálculo de temperatura o de la generación de vapor.

#### 4.3.2.4 Cálculo de la temperatura

```
//Cálculo de incremento de temperatura
if (WaterMass)
{
//Cálculo de temperatura debido al aporte energético(K)
IntermediateTemperature = (c_water*WaterMass*(WaterTemperature+273.15)
+FeedWaterMass*C_FeedWater*(FeedWaterTemperature+273.15))/(c_water* WaterMass
+FeedWaterMass*C_FeedWater);

//IntermediateTemperature = (WaterTemperature+273.15)+(NetEnergy/(c_water
*WaterMass));
} else IntermediateTemperature = FeedWaterTemperature;

/*Serial.println("Temperatura intermedia");
Serial.println(IntermediateTemperature);*/

WaterTemperature = (IntermediateTemperature + (NetEnergy/(c_water*WaterMass))
-273.15);

/*Serial.println("Temperatura de la caldera cuando la energía no genera vapor");
Serial.println(WaterTemperature);*/
```

Como el programa completo se compone de dos etapas, la primera etapa se sitúa donde la caldera se encuentra en condiciones iniciales, es decir, sin agua en el interior de la misma; y la segunda, cuando la caldera está en condiciones necesarias para funcionar. En este punto se debe haber introducido un comando adicional, dependiendo de si lo cumple o no esa variable tiene distinto valor, con el fin de que la ecuación 3.15 funcione correctamente.

#### 4.3.2.5 Generación de vapor

```
if (NetEnergy>HeatEnergy)
{
WaterTemperature=T_saturate;

//Cálculo de la energía sobrante (kJ)
SurplusEnergy = NetEnergy-HeatEnergy;

/*Serial.println("Energia sobrante (kJ)");
Serial.println(SurplusEnergy);*/

//Cálculo de masa de vapor generada
SteamMass += SurplusEnergy/L_ws;

/*Serial.println("Masa de vapor generado (kg)");
Serial.println(SteamMass);*/

//Cálculo de moles
n = (SurplusEnergy/L_ws*1000)/18;

/*Serial.println("n moles");
Serial.println(n);*/
```

```
//Volumen de vapor generado
SteamVolume = v[32] - WaterVolume;

/*Serial.println("Volumen de vapor (m3)");
Serial.println (SteamVolume);*/

//cálculo de la presión generada por la masa de vapor
SteamPressurecreate = ((n*R*(WaterTemperature+273.15))/(SteamVolume-n*b))-
((a*pow(n,2))/pow(SteamVolume,2));

/*Serial.println("presion generada por la masa de vapor");
Serial.println(SteamPressurecreate);*/

//Cálculo de incremento de presión
SteamPressure = SteamPressure+SteamPressurecreate;

/*Serial.println("Presion de la caldera");
Serial.println(SteamPressure);*/

//Cálculo de incremento de volumen
//WaterVolume -= (SteamMass/density_liquid);

if(SurplusEnergy) {
    WaterVolume -= SurplusEnergy/L_ws/density_liquid;
} else WaterVolume = WaterVolume;

/*Serial.println("Volumen de la caldera");
Serial.println(WaterVolume);*/
}
```

Como la energía que se aporta es superior a la energía requerida para llegar a la temperatura de saturación, la temperatura automáticamente se igualará con la temperatura de saturación. Acto seguido se calcula la energía restante disponible 3.9, con la que se realizará la generación de vapor 3.19, con el correspondiente aumento de presión 3.24 y la variación en el volumen 3.29.



# 5 Resultados

Tras la realización del código, solo se ha simulado el aumento de temperatura y la generación de vapor por aporte energético, debido a que en la compilación que complementa este trabajo no se encuentra desarrollado las ecuaciones necesarias para la simulación del vapor flash.

La verificación del correcto funcionamiento de la simulación se ha efectuado a partir de la observación, a través del puerto serie, de las distintas variables calculadas.

Se han tenido que elaborar varias modificaciones en el código establecido en un primer momento, con el fin de corregir los distintos errores que provocaban el incorrecto funcionamiento del código.

## 5.1 Errores en la programación

1. Errores básicos de programación → Falta de ";" al final de una función, falta de cierre de un paréntesis, etc.
2. Error en la introducción de datos → Se introdujo los mismo valores para dos variables distintas.
3. Error en los cálculos debido a la unidades → En las ecuaciones se mezclaron valores con distintas unidades, produciendo resultados incorrectos.
4. Error en la utilización de variables → Para el cálculo del vapor flash se estaba usando el valor del calor sensible del vapor en vez del agua líquida.
5. Error en la estructura → Se colocó los distintos cálculos de interpolación dentro del bucle de búsqueda de la presión existente. Debido a esto, la interpolación daba lugar a valores infinitos.
6. Error en las variables → No utilizaba las variables utilizadas por el tutor, por lo que los cálculos no afectaban al resto del sistema.
7. Error por falta de variable → No se introdujo todas las variables necesarias en distintas ecuaciones, como por ejemplo, la introducción de la variable para el calor específico del agua de calentamiento, por lo que el cálculo de temperatura no se realizaba con éxito.
8. Error con el tiempo de simulación → El valor del tiempo de simulación se utiliza en varias ecuaciones a lo largo del código. Como en dichas ecuaciones se utilizan valores decimales, al usar el tiempo como valor entero, el valor resultante era erróneo. Para solucionarlo, el tiempo se toma como valor flotante en dichas ecuaciones.
9. Error por redondeo de decimales → Cuando se realiza el cálculo de la energía requerida para llegar a la temperatura de saturación, la diferencia existente entre la temperatura de saturación y la temperatura de la caldera nunca llegaba a cero, debido a decimales. Para evitarlo, se colocó un diferencia de 0.05.
10. Error por calor → Debido al tiempo que tardaba la simulación, se producía un recalentamiento en la placa, afectando a los cálculos a realizar.

## 5.2 Datos obtenidos en la simulación

Se han realizado distintas simulaciones variando la potencia del quemador con el fin de observar el comportamiento de la caldera. Destacar que la simulación de vapor flash no está realizado debido a que no existe una línea de consumo establecida.

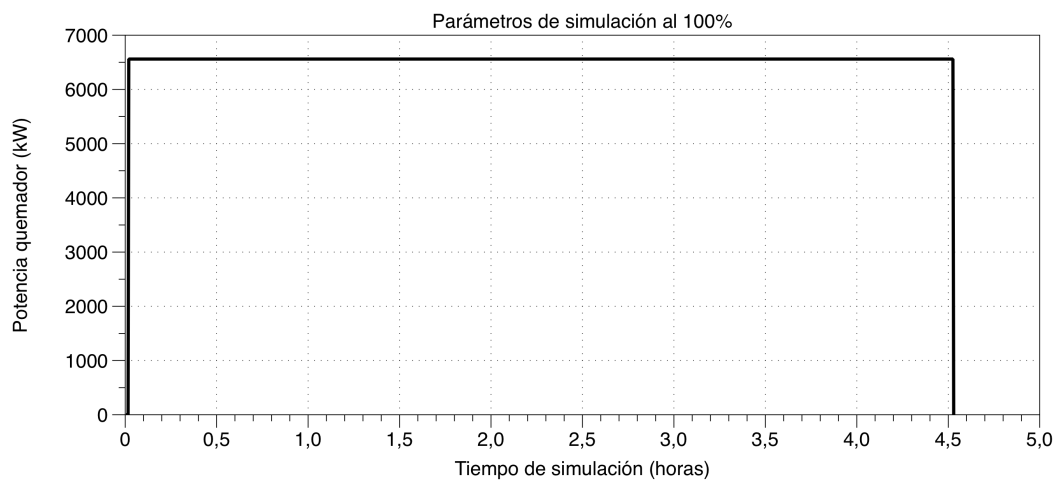
### 5.2.1 Posición del quemador al 100 %

El tiempo total de la simulación es 04:33:27.925 horas, el cual lo podemos en tres momentos de gran interés:

1. Tiempo transcurrido desde el inicio del barrido hasta alcanzar la primera temperatura de saturación → 01:49:16.031 horas.
2. Tiempo transcurrido desde la primera temperatura de saturación hasta alcanzar la presión de trabajo → 02:08:34.493 horas.
3. Tiempo transcurrido desde la presión de trabajo hasta alcanzar la presión máxima. → 00:35:37.401 horas.

Los datos recogidos al final de la simulación son:

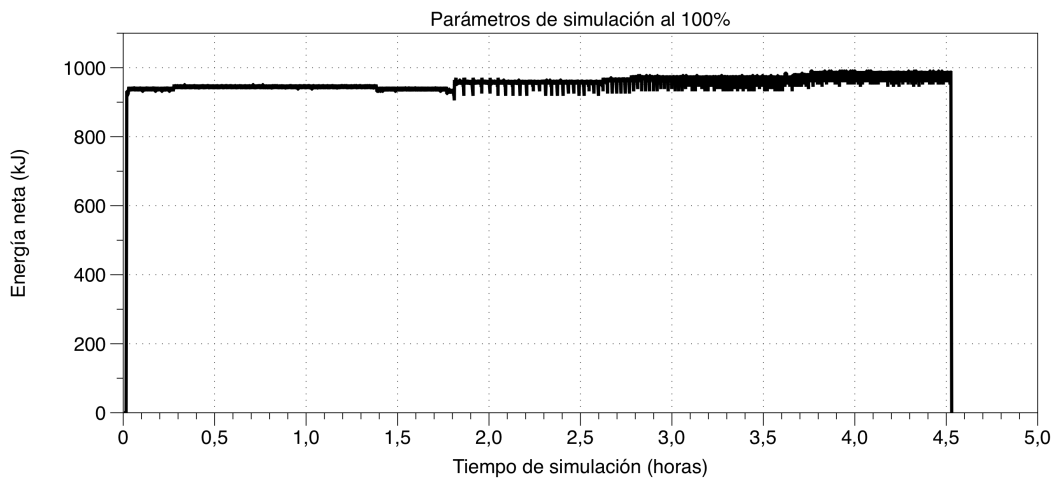
- Variación del volumen de agua ( $m^3$ ) →  $0.07 m^3$ .
- Masa de vapor generado (kg) → 78.40 kg.
- Volumen ocupado por el vapor generado ( $m^3$ ) →  $8.14 m^3$ .



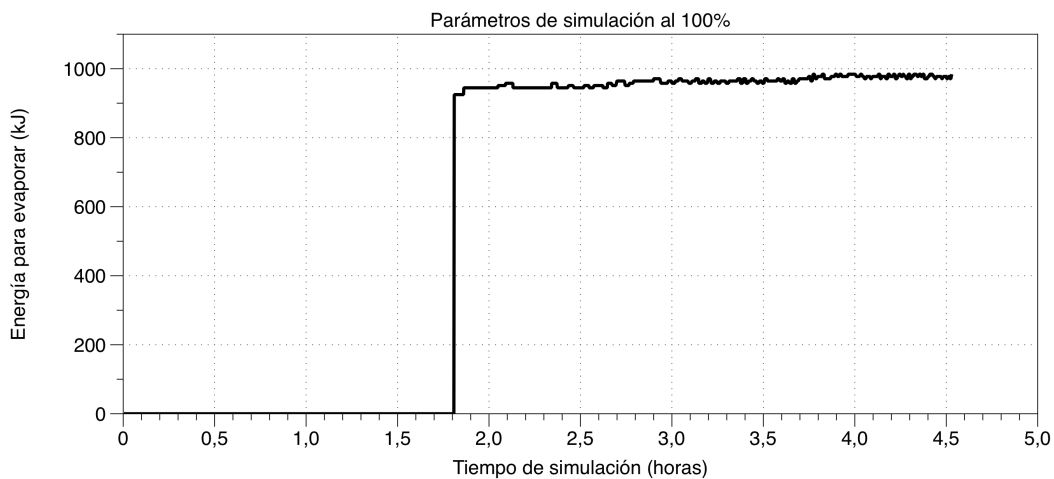
**Figura 5.1:** Potencia del quemador.

**Fuente:** Elaboración propia.

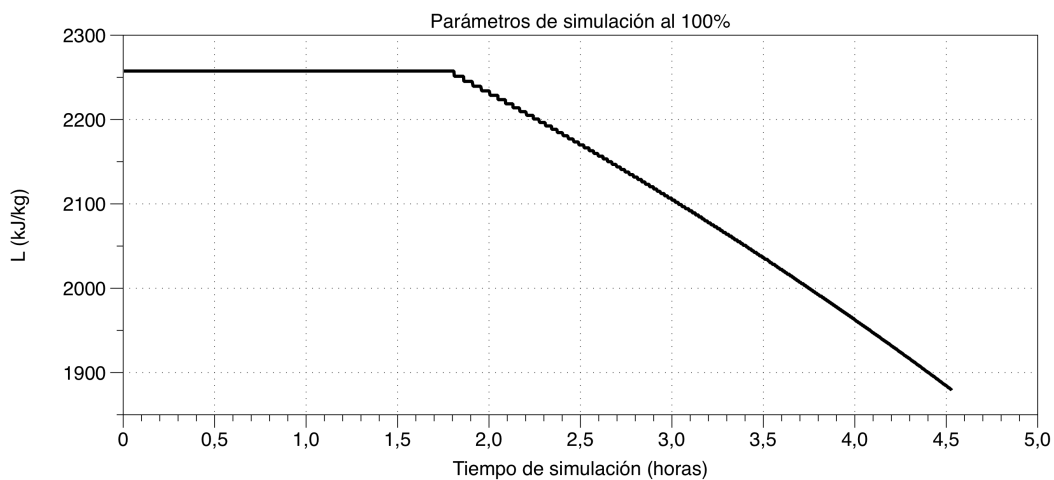




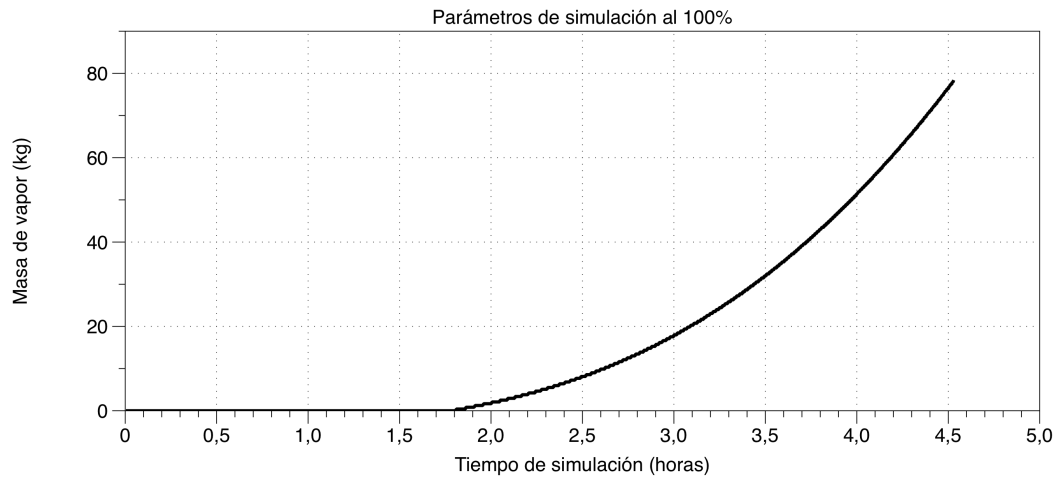
**Figura 5.2:** Energía neta.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 5.3:** Energía de evaporación.  
**Fuente:** Elaboración propia.

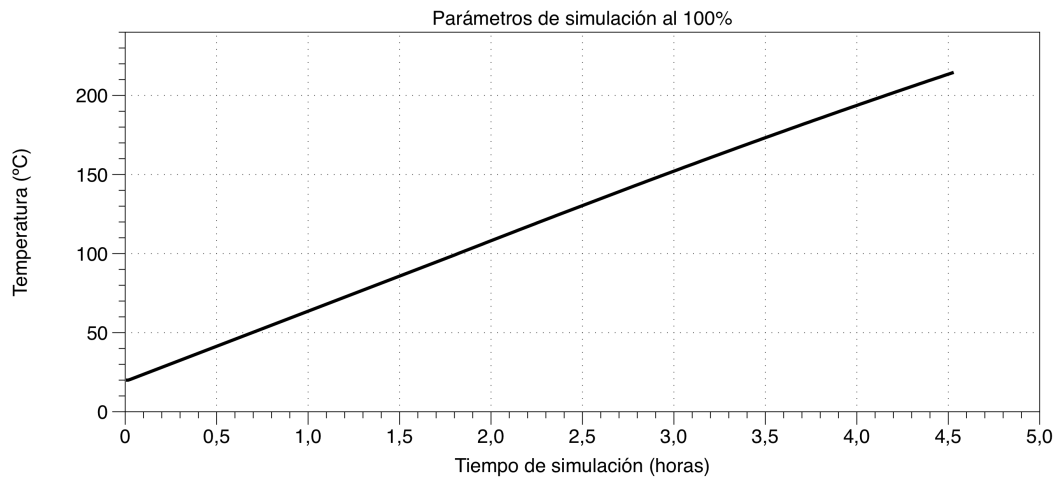


**Figura 5.4:** Calor latente.  
**Fuente:** Elaboración propia.



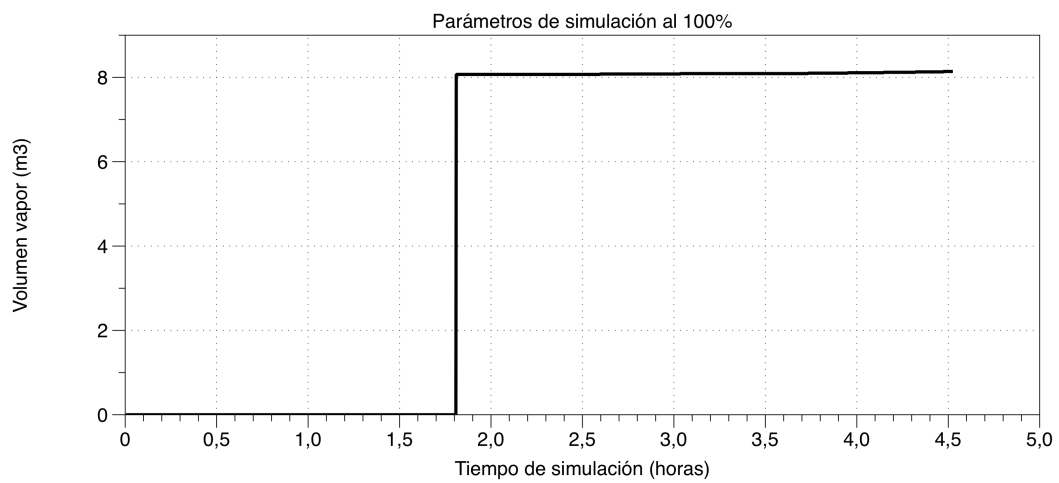
**Figura 5.5:** Masa de vapor generado.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.6:** Aumento de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.7:** Masa de vapor generado.

Fuente: Elaboración propia.

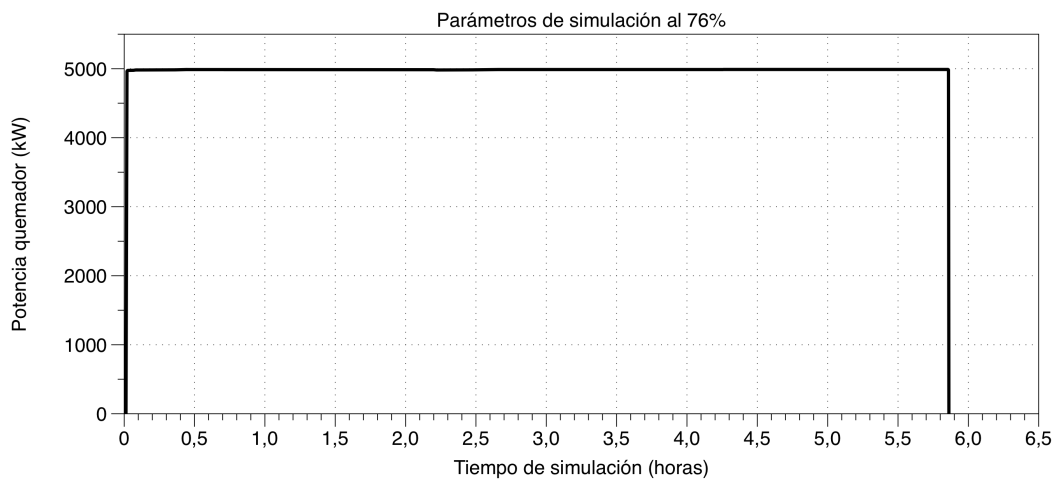
### 5.2.2 Posición del quemador al 76 %

El tiempo total de la simulación es 05:53:53.500 horas, el cual lo podemos en tres momentos de gran interés:

1. Tiempo transcurrido desde el inicio del barrido hasta alcanzar la primera temperatura de saturación → 02:23:03.391 horas.
2. Tiempo transcurrido desde la primera temperatura de saturación hasta alcanzar la presión de trabajo → 02:46:25.408 horas.
3. Tiempo transcurrido desde la presión de trabajo hasta alcanzar la presión máxima. → 00:44:24.701 horas.

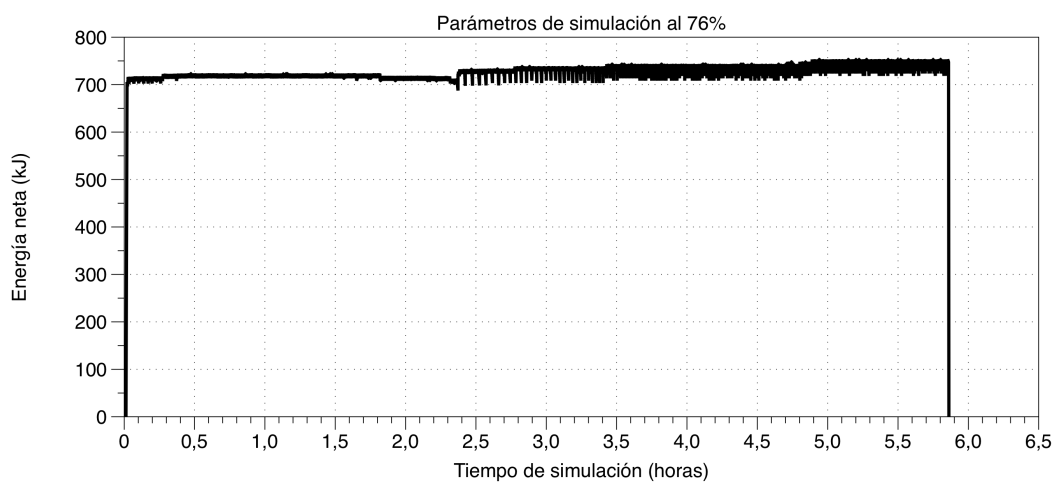
Los datos recogidos al final de la simulación son:

- Variación del volumen de agua ( $m^3$ ) →  $0.07 m^3$ .
- Masa de vapor generado (kg) → 78.23 kg.
- Volumen ocupado por el vapor generado ( $m^3$ ) →  $8.13 m^3$ .



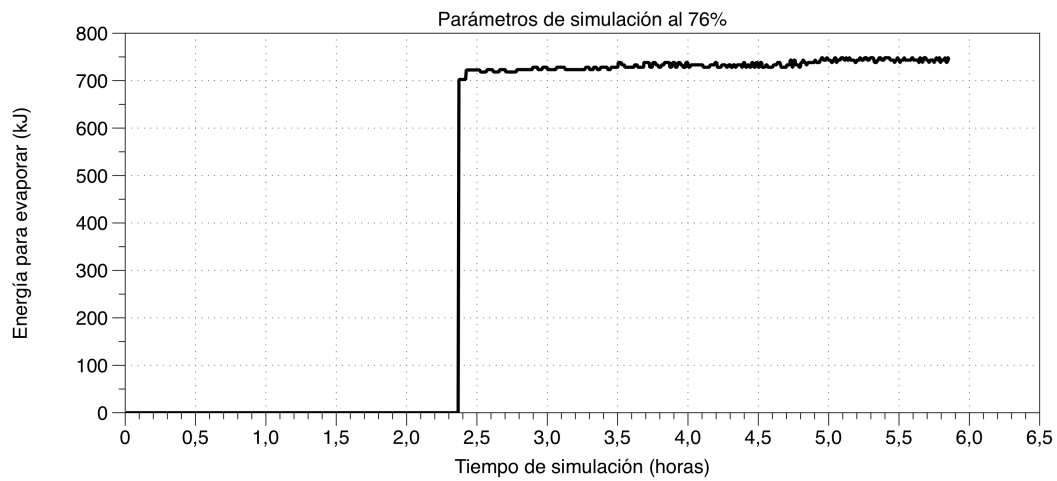
**Figura 5.8:** Potencia del quemador.

Fuente: Elaboración propia.



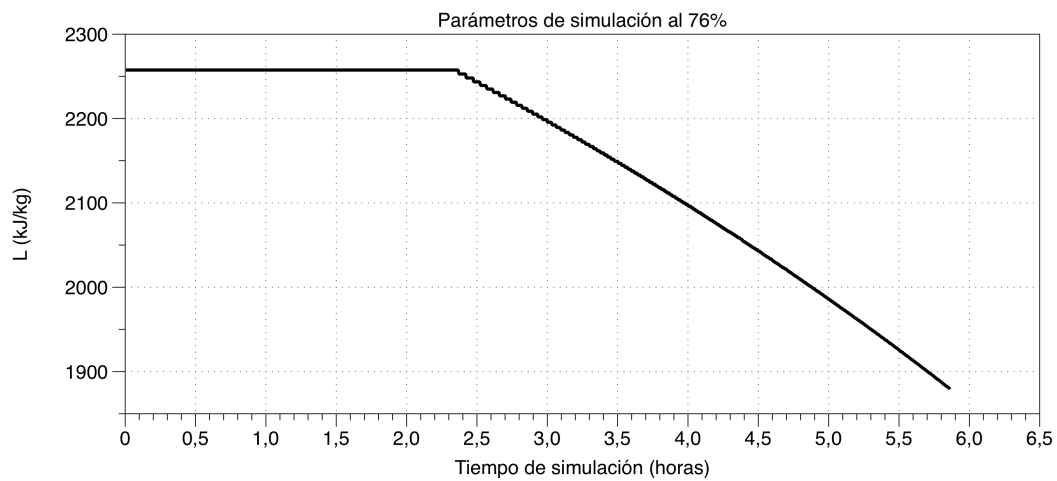
**Figura 5.9:** Energía neta.

Fuente: Elaboración propia.



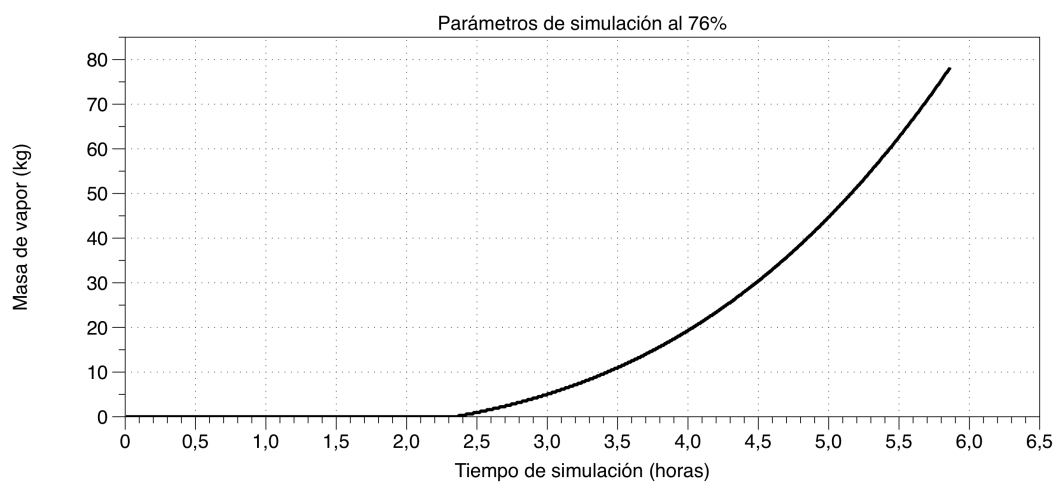
**Figura 5.10:** Energía de evaporación.

Fuente: Elaboración propia.



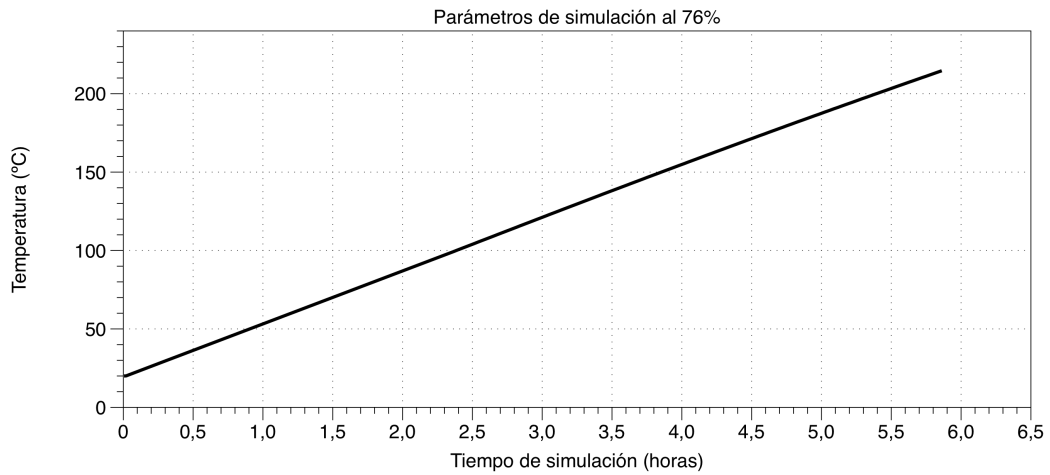
**Figura 5.11:** Calor latente.

Fuente: Elaboración propia.



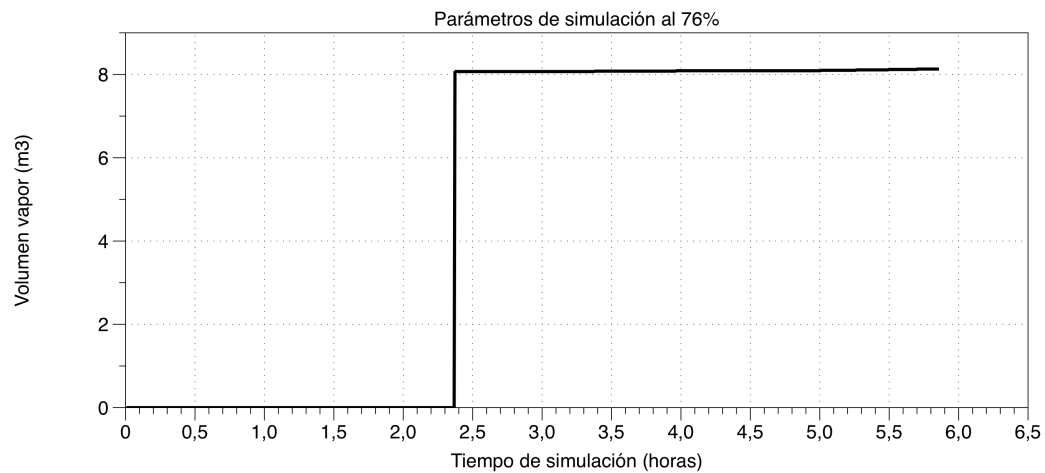
**Figura 5.12:** Masa de vapor generado.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.13:** Aumento de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.14:** Masa de vapor generado.

Fuente: Elaboración propia.

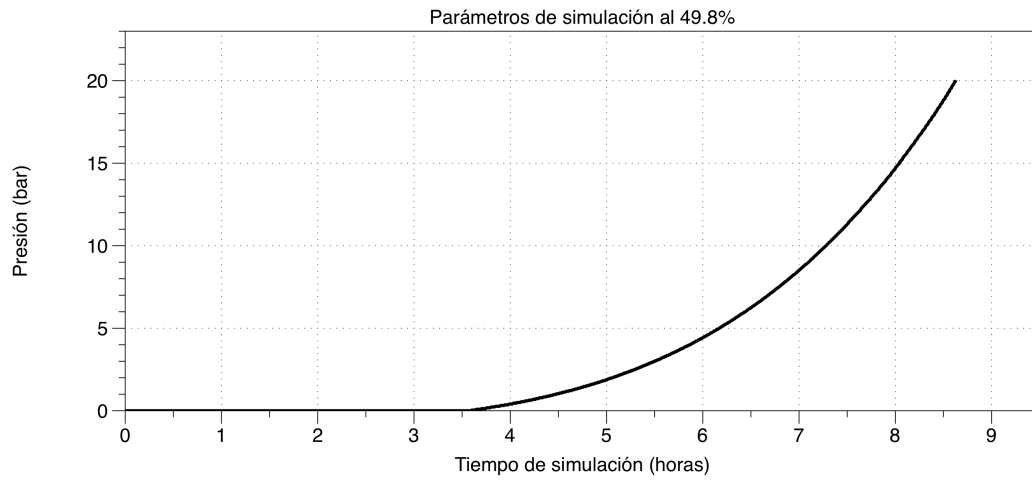
### 5.2.3 Posición del quemador al 49.8 %

El tiempo total de la simulación es 08:41:14.386 horas el cual lo podemos en tres momentos de gran interés:

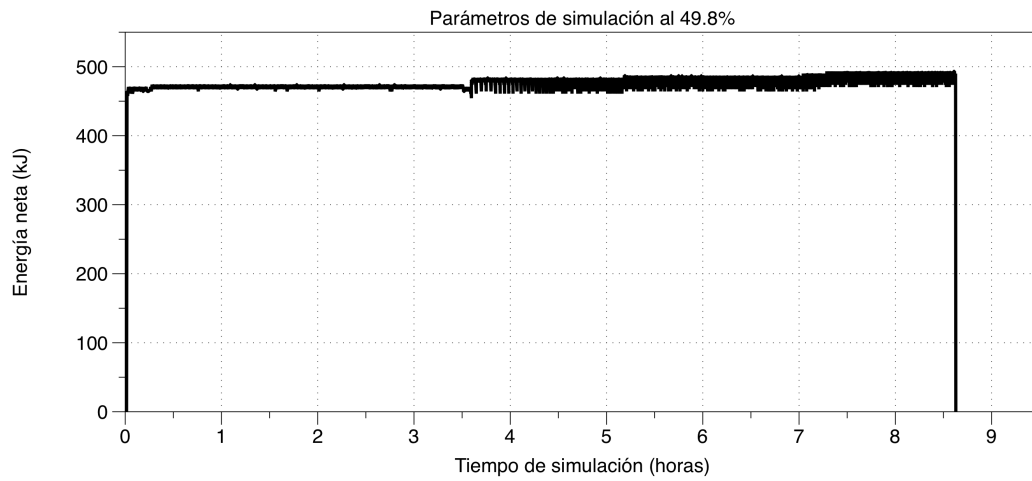
1. Tiempo transcurrido desde el inicio del barrido hasta alcanzar la primera temperatura de saturación → 03:36:16.718 horas.
2. Tiempo transcurrido desde la primera temperatura de saturación hasta alcanzar la presión de trabajo → 04:02:54.708 horas.
3. Tiempo transcurrido desde la presión de trabajo hasta alcanzar la presión máxima. → 01:01:02.960 horas.

Los datos recogidos al final de la simulación son:

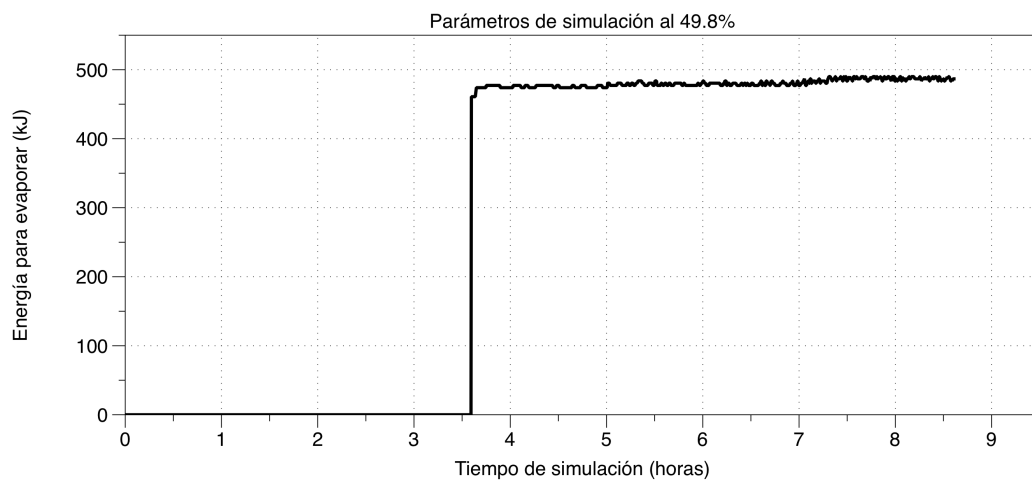
- Variación del volumen de agua ( $m^3$ ) →  $0.06 m^3$ .
- Masa de vapor generado (kg) → 78.22 kg.
- Volumen ocupado por el vapor generado ( $m^3$ ) →  $8.13 m^3$ .



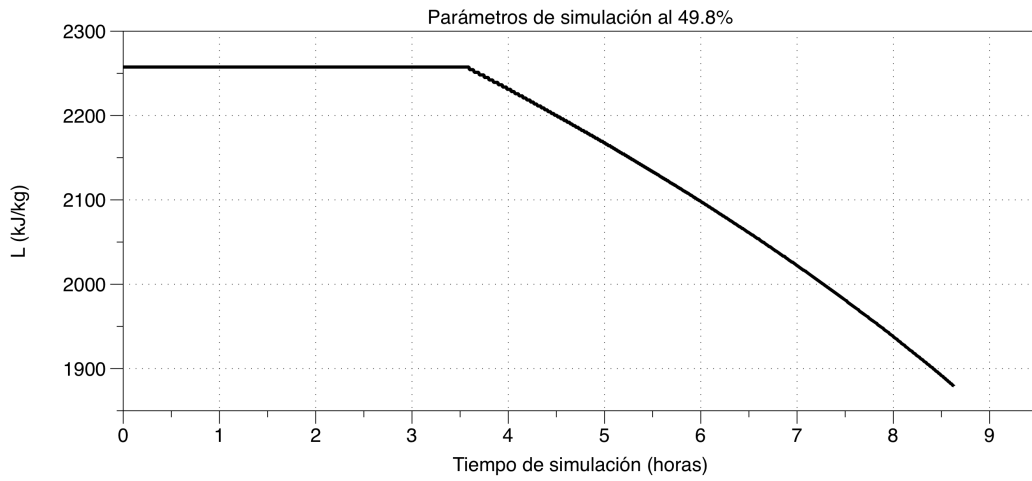
**Figura 5.15:** Potencia del quemador.  
Fuente: Elaboración propia.



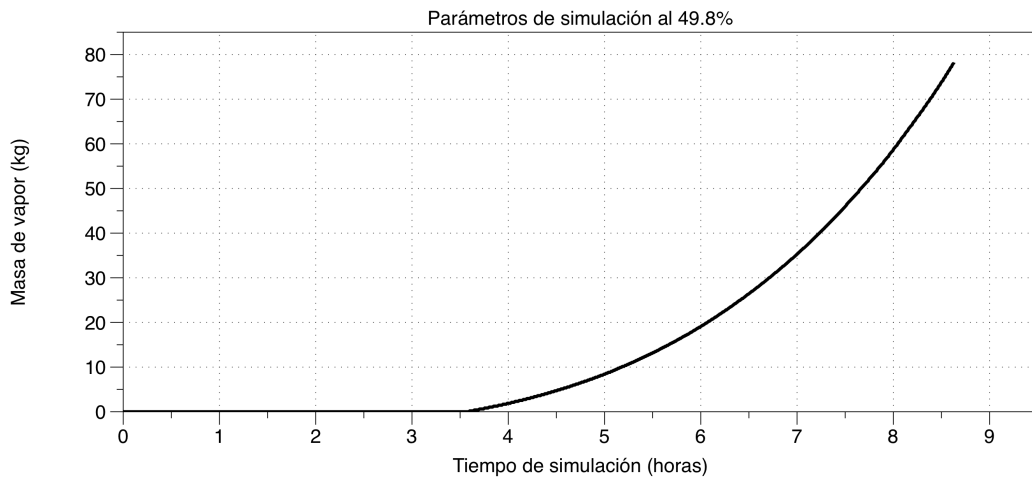
**Figura 5.16:** Energía neta.  
Fuente: Elaboración propia.



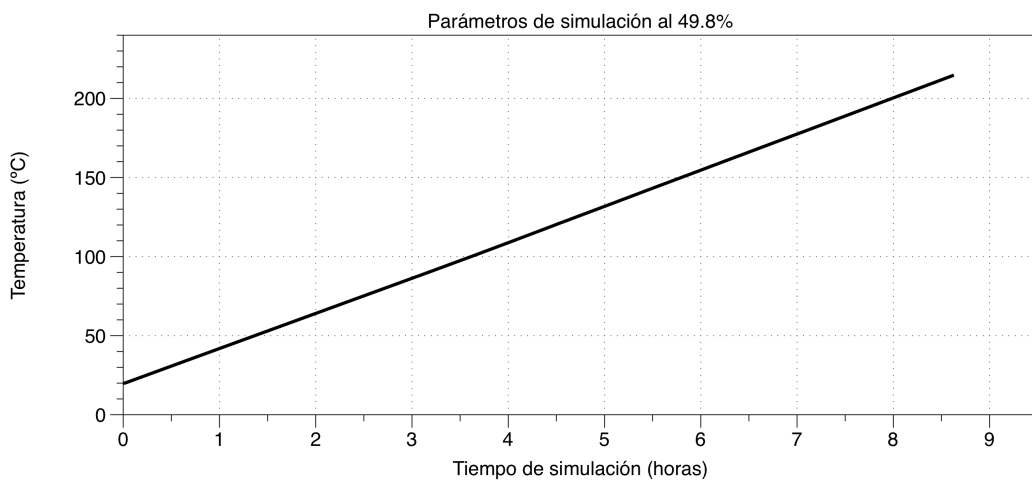
**Figura 5.17:** Energía de evaporación.  
Fuente: Elaboración propia.



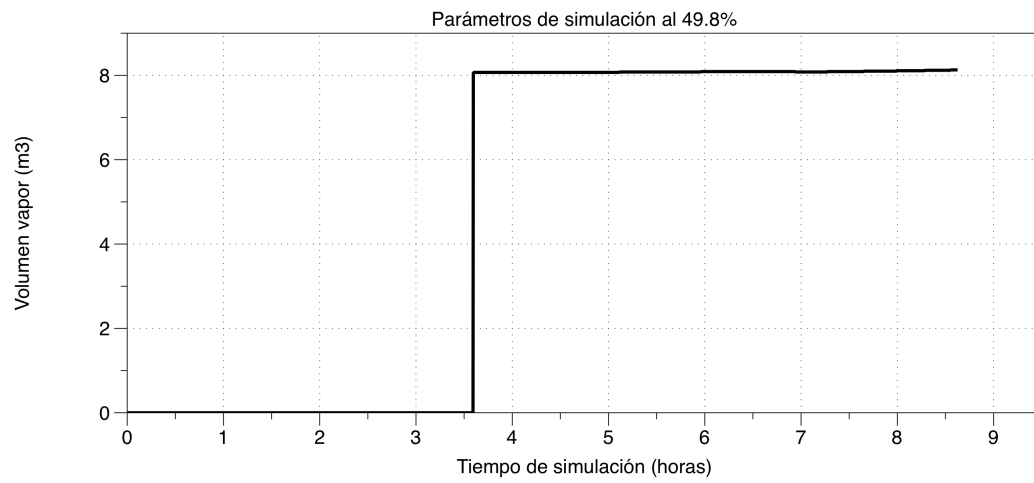
**Figura 5.18:** Calor latente.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 5.19:** Masa de vapor generado.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 5.20:** Aumento de temperatura.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 5.21:** Masa de vapor generado.

Fuente: Elaboración propia.



# 6 Discusión y conclusión

## 6.1 Comprobación del correcto funcionamiento del simulador

Para comprobar que los datos que se obtienen durante la simulación son correctos, se realiza el despeje de los moles en la ecuación 2.7. El resultado que se consigue es un valor aproximado al valor real.

Un vez finalizado la simulación, se comprueban los datos comparándolos con el valor obtenido mediante la ecuación 2.8. El valor de esta ecuación es el valor real que debería generar la simulación.

De dicha estimación, se obtiene:

	Masa estimada (kg) con la ecuación 2.7	Masa estimada (kg) con la ecuación 2.8	Masa simulada (kg)
Quemador al 100 %	73.41	77.58	78.40
Quemador al 76 %	73.25	77.40	78.24
Quemador al 49.8 %	73.26	77.41	78.22

**Tabla 6.1:** Comprobación del funcionamiento del simulador.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 6.2 Conclusión

El objetivo del trabajo era la realización de un algoritmo que simulará el aumento de temperatura y la generación de vapor, tanto por el aporte energético como por caída de presión. Por motivos de plazos, no se pudo complementar el código con las ecuaciones referentes a la línea principal de la caldera. Como consecuencia, no ha sido posible efectuar la simulación de la generación de vapor por caída de presión.

Este tipo de trabajo, sin necesidad de disponer de un elevado presupuesto, permite adquirir conocimientos básicos de programación, así como mejorar tus habilidades referentes a la planificación y organización. Además, permite profundizar en los conocimientos que se adquieren durante la etapa académica.

Por otro, la realización de simuladores de bajo coste puede ser beneficiosos para distintas empresas. Al implementarlas, podrían efectuar simulaciones previas relacionadas con el puesto de trabajo que van a realizar, mejorando la adaptación de los nuevos empleados y ahorrando a la empresa un coste económico debido a un error humano provocado por el desconocimiento inicial del funcionamiento y comportamiento del sistema.

A modo de conclusión, este algoritmo tiene la posibilidad de seguir mejorando:

- Variación del volumen → En esta simulación se realiza la variación del volumen debido a la generación de vapor, pero no tiene en cuenta la variación del volumen debido a la densidad del agua, la cual varía con la temperatura.
- Simulación de la línea de consumo → Con la inclusión de la línea de consumo se podría simular su apertura con la correspondiente caída de presión y por tanto, la generación de vapor flash.
- Válvula de seguridad → En esta simulación cuando la presión llega a la presión máxima establecida, se produce el apagado del quemador, pero la presión dentro de la caldera no varía. Si se realizara la función de la válvula de seguridad, la presión disminuirá, haciendo la simulación aún más real.

# Bibliografía

- [1] ARDUINO. [Página web], [consultado 16 de Febrero de 2017]. URL: <https://www.arduino.cc/>.
- [2] ARDUINO, *ARDUINO MEGA 2560*. [Página web], [consultado 23 de Agosto de 2017]. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>.
- [3] COMEVAL COMPANY, *Tabla de vapor*. [Página web], [consultado 25 de Marzo de 2017]. URL: <http://www.comeval.es/catalogos-boletines-tecnicos.html>.
- [4] COMPAÑIA TLV, *Steam and condensate. Flash steam Generation - Fundamental Physics*. [Página web], [consultado 30 de Abril de 2017]. URL: <http://www.engineeringtoolbox.com>.
- [5] COMPAÑIA TLV, *Fundamentos de vapor. Vapor flash*. [Página web], [consultado 30 de Abril de 2017]. URL: <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/#1.%20Fundamentos%20de%20Vapor>.
- [6] COMPAÑIA TLV, *Cátedra de Integración III. Gases y vapores*. [Página web], [consultado 5 de Abril de 2017]. URL: <https://www.fro.utn.edu.ar/catedras/index.php#>.
- [7] DPTO. DE BIOQUÍMICA Y BIOLOGÍA MOLECULAR DE LA UNIVERSIDAD DE MURCIA Y POR EL DPTO. DE BIOLOGÍA Y GEOLOGÍA DEL I.E.S. RAMÓN Y CAJAL DE MURCIA, *Tema 1.2.: Propiedades físicas del agua-químicas del agua*. [Página web], Marzo 1999 [consultado 1 de Marzo de 2017]. URL: <https://www.um.es/molecula/indice.htm>.
- [8] DPTO DE FÍSICA APLICADA III. UNIVERSIDAD DE SEVILLA, *Bloque I: Termodinámica. Tema 1.5.: Propiedades del agua*. [Página web], [consultado 2 de Marzo de 2017]. URL: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/F%C3%ADsica\\_I\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/F%C3%ADsica_I(GIE)).
- [9] DRA. BEATRIZ AÑORBE DÍAZ, *Fundamentos químicos aplicados al buque*. s.n ed., Panamá, 34, Nave 11, Polígono Industrial Costa Sur 38009 Santa Cruz de Tenerife: GRAFIEXPRESS, S.L., Octubre 2011, ISBN 978-84-615-2939-1.
- [10] ERNESTO DE JESÚS ALCAÑIZ, *Tema 6. Los gases*. [Página web], 1994 [consultado 5 de Abril de 2017]. URL: <http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QG.htm>.
- [11] ERNESTO DE JESÚS ALCAÑIZ, *Tema 8: Equilibrios entre sólido, líquido y gas*. [Página web], 1994 [consultado 7 de Marzo de 2017]. URL: <http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QG.htm>.
- [12] FAUSTO T. GRATTON., *Cap. 8b. VanderWaals*. [Página web], [consultado 15 de Abril de 2017]. URL: <http://www.lfp.uba.ar/es/notas%20de%20cursos/notasmecanicafaustogratton/notasmecanicafaustogratton.php>.
- [13] GERMÁN A. PRIETO, *Cápitulo 4: Interpolación*. [Página web], [consultado 28 de Marzo de 2017]. URL: <http://wwwprof.uniandes.edu.co/~gprieto/classes/compufis/interpolacion.pdf>.
- [14] GRUPO DE VOLUNTARIOS, *Processing*. [Página web], [consultado 23 de Agosto de 2017]. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>.
- [15] GRUPO DE VOLUNTARIOS, *Wiring*. [Página web], [consultado 23 de Agosto de 2017]. URL: <http://wiring.org.co/>.
- [16] HIPERTEXTUAL, *Hardware para novatos: Arduino*. [Página web], [consultado 15 de Febrero de 2017]. URL: <https://hipertextual.com/archivo/2014/03/hardware-novatos-arduino/>.

- [17] INMACULADA FÉRNANDEZ DIEGO, SEVERIANO F. PÉREZ REMESAL Y CARLOS J. RENEDO ESTÉBANEZ, *Tabla de datos*. [Página web], [consultado 25 de Marzo de 2017]. URL: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/termodinamica-y-maquinas-termicas/ejercicios-proyectos-y-casos>.
- [18] JORGE ALFARO, *9 gases reales*. [Página web], [consultado 5 de Abril de 2017]. URL: <http://www.fis.puc.cl/~jalfaro/fis1523/clases/>.
- [19] JUAN J CORACE, *Unidad II: Equilibrio termodinámico*. [Página web], [consultado 10 de Abril de 2017]. URL: <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/2012/t2.pdf>.
- [20] LUIS DEL VALLE, *80. Processing, el lenguaje para gráficos*. [Página web], [consultado 23 de Agosto de 2017]. URL: <https://programarfacil.com/podcast/80-processing-lenguaje-para-graficos/>.
- [21] MCI ELECTRONICS, *¿Que es Arduino?* [Página web], [consultado 16 de Febrero de 2017]. URL: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>.
- [22] MIRIAM JANET RUIZ, *Gases ideales*. [Página web], 2012 [consultado 6 de Abril de 2017]. URL: <http://gasesidealesrmb.blogspot.com.es/>.
- [23] PEDRO RIVERO RODRÍGUEZ, *Conceptos previos*. Dpto. de Ingeniería Marítima. Universidad de La Laguna, 2015.
- [24] PROF. CARLOS GUTIÉRREZ, *tablas y diagramas*. [Página web], [consultado 25 de Marzo de 2017]. URL: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/gutierrezc/CURSOS/INTRODUCCION%20ING%20QCA/>.
- [25] ROMULO BENITEZ, *Historia de Arduino y su nacimiento*. [Página web], 2012 [consultado 16 de Febrero de 2017]. URL: <https://botscience.wordpress.com/2012/06/05/historia-de-arduino-y-su-nacimiento/>.
- [26] S.N. [Página web], 2016 [consultado 15 de Febrero de 2017]. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino#Especificaciones>.
- [27] S.N., *Arduino:tecnología para todos*. [Página web], [consultado 15 de Febrero de 2017]. URL: <http://arduinodhtics.weebly.com/bibliografiacutea.html>.
- [28] S.N., *Wiring*. [Página web], [consultado 23 de Agosto de 2017]. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/Wiring>.
- [29] S.N., *Steam and condensate. Properties of saturated Steam - Pressure in bar*. [Página web], [consultado 25 de Marzo de 2017]. URL: <http://www.engineeringtoolbox.com>.
- [30] STEVEN C. STULTZ AND JOHN B. KITTO, *STEAM its generation and use*. 40 ed., Barberton, Ohio, U.S.A.: The Babcock & Wilcox Company, 1992, ISBN 0-9634570-0-4.
- [31] V.OJOTIN, V.ZHIDKIJ, V. LAVIGUIN Y F. SALOMZODA, *Fundamentos de termotecnia*. s.n ed., Moscú: Editorial MIR MOSCU, 1984, ISBN 5-03-000582X.
- [32] W.H. SEVERNS, H.E. DEGLER Y J.C. MILES, *Energía mediante Vapor, Aire o Gas*. s.n ed., Loreto, 13-15. Local B 08029 Barcelona. ESPAÑA: Editorial REVERTÉ, 1974, ISBN 978-84-291-4890-9.

# Anexos



# A Tablas de búsqueda

```
//Presión absoluta (bar)
float Pa[67] = {0.02,0.03,0.04,0.05,0.06,0.07,0.08,0.09,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,
0.8,0.9,1,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9,2,2.2,2.4,2.6,2.8,3,3.5,4,4.5,5,5.5,6,
6.5,7,7.5,8,8.5,9,9.5,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30};

//Temperatura de saturación (°C)
float Ts[67] = {17.49525668,24.07994125,28.9615038,32.87548952,36.16025915,39.0008632,
41.5100527, 43.76184161,45.80754821,60.05864266,69.09543192,75.85682151,81.316736,
85.92577749, 89.93151007,93.48535413,96.68703928,99.60591861,102.2922739,104.7837843,
107.1094527,109.2921059,111.3500495,113.2982006,115.1488843,116.9124081,118.597484,
120.2115459,123.2513641,126.0736778,128.7107006,131.1878063,133.5253579,138.8607392,
143.612533,147.908097,151.8362439,155.4615254,158.832424,161.9863363,164.9527526,
167.7553645,170.4135108,172.9431954,175.3578221,177.6687365,179.8856324,184.0696757,
187.9646416,191.6127585,195.0473583,198.2952429,201.378308,204.3146875,207.1195805,
209.8058608,212.3845353,214.8650936,217.2557784,219.5637985,221.7954972,223.9564875,
226.0517621,228.0857829,230.0625549,231.9856872,233.858445};

//Densidad del líquido (kg/m3)
float dl[67] = {998.6432663,997.2352714,995.9171311,994.7069626,993.5929405,
992.5608173,991.5982607,990.6952313,989.8436374,983.1449781,978.262299,974.3153088,
970.9544371,968.0011211,965.3504248,962.9348401,960.7080844,958.6368897,956.6964499,
954.8677203,953.1357257,951.488454,949.9161068,948.4105747,946.9650624,945.5738121,
944.2318986,942.9350721,940.4623581,938.13119,935.9223743,933.8205535,931.8132267,
927.144614,922.8847335,918.9509369,915.2843434,911.841361,908.5887154,905.5003693,
902.5555232,899.7372698,897.0316594,894.4270333,891.9135371,889.4827583,887.1274517,
882.6188886,878.3462686,874.2770746,870.3853434,866.6499784,863.0535783,859.581603,
856.2217643,852.9635733,849.7979965,846.7171926,843.7143054,840.783302,837.9188419,
835.1161726,832.3710434,829.6796353,827.0385029,824.4445253,821.8948655};

//Densidad del vapor (kg/m3)
float dv[67] = {0.014927683,0.021903392,0.028741851,0.035478222,0.042133261,
0.048720704,0.055250325,0.061729439,0.068163731,0.130750549,0.191257234,0.250431362,
0.308627765,0.366055122,0.422851064,0.479113204,0.534914361,0.590310924,0.645347829,
0.700061714,0.754483009,0.808637378,0.862546754,0.916230087,0.96970391,1.022982769,
1.076079555,1.129005771,1.234386777,1.339197073,1.443495707,1.547332354,1.650749356,
1.90768401,2.162668188,2.416039734,2.66805803,2.918928201,3.168816348,3.417859599,
3.666173016,3.913854473,4.160988221,4.407647525,4.653896682,4.899792567,5.145385853,
5.635841928,6.125578636,6.614856154,7.103894034,7.592880326,8.081978197,8.571330844,
9.061065216,9.55129488,10.04212227,10.53364045,11.02593459,11.51908307,12.01315846,
12.50822831,13.00435582,13.50160036,14.00001798,14.49966176,15.00058222};
```

//Volumen específico vapor (m<sup>3</sup>/kg)

```
float Vev[67] = {66.98963294,45.65502867,34.79247005,28.18630501,23.73421782,
20.52515507,18.09944115,16.19972591,14.67055849,7.648151422,5.228560405,3.993110091,
3.240149181,2.731829003,2.364898859,2.087189398,1.869458129,1.694022523,1.54955197,
1.428445492,1.325410895,1.236648252,1.159357444,1.091428905,1.031242619,0.977533572,
0.929299321,0.885735065,0.810118853,0.746716089,0.692762712,0.646273567,0.605785485,
0.524195828,0.462391783,0.413900478,0.374804442,0.342591503,0.315575247,0.292580772,
0.272763996,0.255502602,0.240327525,0.226878396,0.2148737,0.204090272,0.194348884,
0.177435778,0.163249884,0.151174867,0.140767866,0.131702326,0.123732083,0.116667997,
0.1103623,0.104697846,0.099580544,0.094933941,0.09069526,0.086812465,0.083242055,
0.079947373,0.076897311,0.074065294,0.07142848,0.068967126,0.066664079};
```

//Entalpía específica del líquido (kJ/kg)

```
float Hl[67] = {73.43459215,100.9901719,121.4035637,137.765119,151.4939906,163.3655152,
173.8517686,183.2624749,191.8122952,251.3997384,289.2286546,317.566483,340.4760289,
359.8365212,376.6802992,391.6387578,405.1277529,417.4364858,428.7746425,439.2993637,
449.1316161,458.3666148,467.0807237,475.3361765,483.1843985,490.6684007,497.824541,
504.6838455,517.6152017,529.6370338,540.8838511,551.4616233,561.4554103,584.3113342,
604.7234742,623.2243134,640.1853354,655.8766515,670.501208,684.2156016,697.1433607,
709.3837577,721.0178484,732.1127302,742.7246151,752.9010953,762.6828443,781.1977431,
798.4989063,814.7636901,830.1321416,844.7169148,858.6100728,871.8878879,884.6143084,
896.8435167,908.6218511,919.9892732,930.9805046,941.6259194,951.9522521,961.983167,
971.7397182,981.2407265,990.5030905,999.5420434,1008.37137};
```

//Entalpía específica del vapor (kJ/kg)

```
float Hv[67] = {2532.91156,2544.876737,2553.709256,2560.765104,2566.667258,
2571.75605,2576.238638,2580.250891,2583.886937,2608.947456,2624.551141,2636.050834,
2645.213238,2652.853197,2659.4172,2665.177698,2670.313752,2674.949641,2679.175305,
2683.058029,2686.649521,2689.990419,2693.113266,2696.044543,2698.806102,2701.416195,
2703.890231,2706.241341,2710.618422,2714.621102,2718.306009,2721.717649,2724.891667,
2731.965242,2738.056623,2743.386405,2748.107615,2752.33089,2756.13889,2759.595036,
2762.749083,2765.640794,2768.302465,2770.760686,2773.037623,2775.151947,2777.119538,
2780.667156,2783.769133,2786.493361,2788.893014,2791.010536,2792.880364,2794.530829,
2795.98553,2797.264337,2798.38414,2799.35942,2800.202688,2800.924829,2801.53537,
2802.042704,2802.454255,2802.776629,2803.015727,2803.176842,2803.264739};
```

//Calor latente (kJ/kg)

```
float L[67] = {2459.476968,2443.886565,2432.305693,2422.999985,2415.173268,
2408.390535,2402.38687,2396.988416,2392.074642,2357.547718,2335.322486,2318.484351,
2304.73721,2293.016675,2282.736901,2273.53894,2265.185999,2257.513155,2250.400662,
2243.758665,2237.517905,2231.623805,2226.032542,2220.708366,2215.621703,2210.747794,
2206.06569,2201.557496,2193.00322,2184.984068,2177.422158,2170.256026,2163.436256,
2147.653908,2133.333149,2120.162092,2107.922279,2096.454239,2085.637682,2075.379435,
2065.605722,2056.257037,2047.284616,2038.647956,2030.313008,2022.250852,2014.436693,
1999.469413,1985.270227,1971.729671,1958.760872,1946.293622,1934.270291,1922.642941,
1911.371222,1900.42082,1889.762289,1879.370147,1869.222184,1859.298909,1849.583118,
1840.059537,1830.714537,1821.535903,1812.512637,1803.634799,1794.893369};
```

//Calor específico (kJ/kgK)

```
float Ce[67] = {18.644,18.694,18.736,18.774,18.808,18.84,18.871,18.899,18.927,
19.156,19.343,19.506,19.654,19.79,19.919,20.04,20.156,20.267,20.373,20.476,20.576,
20.673,20.768,20.86,20.95,21.037,21.124,21.208,21.372,21.531,21.685,21.835,21.981,
22.331,22.664,22.983,23.289,23.585,23.873,24.152,24.424,24.69,24.951,25.206,25.456,
25.702,25.944,26.418,26.878,27.327,27.767,28.197,28.62,29.036,29.445,29.849,30.248,
30.643,31.034,31.421,31.805,32.187,32.567,32.944,33.32,33.695,34.069};
```



## B Código fuente

```
void calculateThermodynamicVariables(){

    H_water_b = h_water;

    //Se determinan los valores mínimos y máximos para interpolar
    int i=0;
    for(i=0; i<67; i++) {
        if ((Pa[i]<SteamPressure+1) && (Pa[i+1]>SteamPressure+1)) break;
    }
    //El Bucle sólo se inicia cuando P>0
    if((Pa[i]<SteamPressure+1) && (Pa[i+1]>SteamPressure+1)) {

        //A la presión se le suma +1 debido a que en la tabla de búsqueda, la presión
        es absoluta

        //Calcula la temperatura de saturación con respecto a la presión actual de la
        caldera en este ciclo
        T_saturate = interpolate(SteamPressure+1,Ts[i],Ts[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula la densidad del agua líquida con respecto actual actual de la caldera
        en este ciclo
        density_liquid = interpolate(SteamPressure+1,d1[i],d1[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula la densidad del vapor con respecto a la presión actual de la caldera
        en este ciclo
        density_steam = interpolate(SteamPressure+1,dv[i],dv[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula la entalpía del agua líquida con respecto a la presión actual de la
        caldera en este ciclo
        h_water = interpolate(SteamPressure+1,Hl[i],Hl[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula la entalpía del vapor con respecto a la presión actual de la caldera
        en este ciclo
        h_steam = interpolate(SteamPressure+1,Hv[i],Hv[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula el calor latente del agua líquida con respecto a la presión actual
        de la caldera en este ciclo
        L_ws = interpolate(SteamPressure+1,L[i],L[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);

        //Calcula el calor específico del agua líquida con respecto a la presión
        actual de la caldera en este ciclo
        c_water = interpolate(SteamPressure+1,Ce[i],Ce[i+1],Pa[i],Pa[i+1]);
    }

    //Cálculo de masa de agua en la caldera (Kg)
    WaterMass = WaterVolume*density_liquid;
```

```

//Cálculo de la masa de agua de alimentación (kg)
FeedWaterMass = ((WaterInletFlow/3600) * (float(t_delta)/1000.0))*FeedWaterDensity;
}

void Steamgeneration(){

//Se calcula la energía neta (kJ)
NetEnergy = (float(PowerTransferred)-float(LosePower))*(float(t_delta)/1000.0);

/*Serial.println ("tiempo");
Serial.println (t_delta);
Serial.println ( "potencia quemador");
Serial.println (PowerTransferred);
Serial.println ("losepower");
Serial.println (LosePower);
Serial.println("Energia neta (kJ)");
Serial.println(NetEnergy);*/

// Si la temperatura es inferior a la temperatura de saturacion con respecto a la
presión actual de la caldera en este ciclo
if (WaterTemperature<=T_saturate) {

//Calculo de la energía de calentamiento a ts
if((T_saturate-WaterTemperature)<0.05) {

HeatEnergy = 0;
} else HeatEnergy = ((float(T_saturate)+273.15)-(float (WaterTemperature)+273.15))
*float (c_water)*float (WaterMass);

/*Serial.println("Energia de calentamiento a Ts (kJ)");
Serial.println(HeatEnergy);*/

if (NetEnergy>HeatEnergy) {

WaterTemperature=T_saturate;

//Cálculo de la energía sobrante (kJ)
SurplusEnergy = NetEnergy-HeatEnergy;

/*Serial.println("Energia sobrante (kJ)");
Serial.println(SurplusEnergy);*/

//Cálculo de masa de vapor generada
SteamMass += SurplusEnergy/L_ws;

/*Serial.println("Masa de vapor generado (kg)");
Serial.println(SteamMass);*/

//Cálculo de moles
n = (SurplusEnergy/L_ws*1000)/18;

/*Serial.println("n moles");
Serial.println(n);*/

//Volumen de vapor generado
SteamVolume = v[32] - WaterVolume;

```

```

/*Serial.println("Volumen de vapor (m3)");
Serial.println (SteamVolume);*/

//cálculo de la presión generada por la masa de vapor
SteamPressurecreate = ((n*R*(WaterTemperature+273.15))/(SteamVolume-n*b))
-((a*pow(n,2))/pow(SteamVolume,2));

/*Serial.println("presion generada por la masa de vapor");
Serial.println(SteamPressurecreate);*/

//Cálculo de incremento de presión
SteamPressure = SteamPressure+SteamPressurecreate;

/*Serial.println("Presion de la caldera");
Serial.println(SteamPressure);*/

//Cálculo de incremento de volumen
//WaterVolume -= (SteamMass/density_liquid);

if(SurplusEnergy) { WaterVolume -= SurplusEnergy/L_ws/density_liquid;
} else WaterVolume = WaterVolume;

/*Serial.println("Volumen de la caldera");
Serial.println(WaterVolume);*/

} else {

//Cálculo de incremento de temperatura
if (WaterMass) {

//Cálculo de temperatura debido al aporte energético(K)
IntermediateTemperature = (c_water*WaterMass*(WaterTemperature+273.15)
+FeedWaterMass*C_FeedWater*(FeedWaterTemperature+273.15))/(c_water*WaterMass
+FeedWaterMass*C_FeedWater);

//IntermediateTemperature = (WaterTemperature+273.15)+(NetEnergy/(c_water
*WaterMass));
} else IntermediateTemperature = FeedWaterTemperature;

/*Serial.println("Temperatura intermedia");
Serial.println(IntermediateTemperature);*/

WaterTemperature = (IntermediateTemperature + (NetEnergy/(c_water*WaterMass))
-273.15);

/*Serial.println("Temperatura de la caldera cuando la energía no genera vapor");
Serial.println(WaterTemperature);*/
}
}

//Generación de vapor flash
if (h_water<H_water_b){

//Cálculo de la masa de vapor generada
SteamMass = (((H_water_b-h_water)+(NetEnergy/c_water*WaterMass))/L_ws)*WaterMass;

/*Serial.println("Masa de vapor generado");
Serial.println(SteamMass);*/
}

```

```

//Cálculo de Temperatura
if (WaterMass) {

    //Cálculo de temperatura debido al aporte energético(K)
    IntermediateTemperature = (c_water*WaterMass*(WaterTemperature+273.15)+FeedWaterMass
    *C_FeedWater*(FeedWaterTemperature+273.15))/(c_water* WaterMass
    +FeedWaterMass*C_FeedWater);

    //IntermediateTemperature = (WaterTemperature+273.15)+(NetEnergy/(c_water*WaterMass));
    } else IntermediateTemperature = FeedWaterTemperature;

    /*Serial.println("Temperatura intermedia");
    Serial.println(IntermediateTemperature);*/

    WaterTemperature = (IntermediateTemperature + ((h_water-H_water_b)/(c_water*WaterMass))
    -273.15);

    /*Serial.println("disminución de temperatura por vapor flash");
    Serial.println(WaterTemperature);*/

    //Cálculo de moles
    n = (SteamMass*1000)/18;

    /*Serial.println("n moles");
    Serial.println(n);*/

    //Volumen de vapor
    SteamVolume = v[32] - WaterVolume;

    /*Serial.println("Volumen de vapor: (m3)");
    Serial.println (SteamVolume);*/

    //cálculo de la presión generada por la masa de vapor
    SteamPressurecreate = (n*R*(WaterTemperature+273.15))/(SteamVolume-n*b)-(a*pow(n,2))
    /pow(SteamVolume,2);

    /*Serial.println("presion generada por la masa de vapor flash");
    Serial.println(SteamPressurecreate);*/

    //Cálculo de incremento de presión
    SteamPressure = SteamPressure+SteamPressurecreate;

    /*Serial.println("Presion de la caldera");
    Serial.println(SteamPressure);*/

    //Cálculo de incremento de volumen
    WaterVolume = WaterVolume- (SteamMass/density_liquid);

    /*Serial.println("Volumen de la caldera");
    Serial.println(WaterVolume);*/
}

Serial.print (millis ());
Serial.print ("\t");
Serial.print (t_delta);
Serial.print ("\t");
Serial.print (PowerTransferred);

```

```
Serial.print ("\t");
Serial.print (NetEnergy);
Serial.print ("\t");
Serial.print (SteamPressure);
Serial.print ("\t");
Serial.print (WaterTemperature);
Serial.print ("\t");
Serial.print (WaterVolume);
Serial.print ("\t");
Serial.print (WaterMass);
Serial.print ("\t");
Serial.print (SteamVolume);
Serial.print ("\t");
Serial.print (SteamMass);
Serial.print ("\t");
Serial.print (T_saturate);
Serial.print ("\t");
Serial.print (L_ws);
Serial.print ("\t");
Serial.print (HeatEnergy);
Serial.print ("\t");
Serial.println (SurplusEnergy);
}
```

