

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VAPORIZADOR ELÉCTRICO DE USO DOMÉSTICO

### DISEÑO TÉRMICO, CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PRUEBAS DEL VAPORIZADOR ELÉCTRICO DE USO DOMÉSTICO

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

LIZBETH DAYANA JARAMILLO CUEVA

[lizabeth.jaramillo@epn.edu.ec](mailto:lizabeth.jaramillo@epn.edu.ec)

DIRECTOR: ING. ÁNGEL ADALBERTO PORTILLA AGUILAR, Msc.

[angel.portilla@epn.edu.ec](mailto:angel.portilla@epn.edu.ec)

DMQ, agosto 2022

## CERTIFICACIONES

Yo, LIZBETH DAYANA JARAMILLO CUEVA, 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.



LIZBETH DAYANA JARAMILLO CUEVA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por LIZBETH DAYANA JARAMILLO CUEVA, bajo mi supervisión.




ING. ÁNGEL ADALBERTO PORTILLA AGUILAR, MSC.  
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.



Ing. Miguel Ortega  
REVISOR1 DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR



Ing. Washington Reina  
REVISOR2 DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo con todo mi amor a:

Dios por darme la salud, el entendimiento, la perseverancia y encaminar mis pasos a lo largo de mi vida.

A mis amados padres, Eufemia Cueva y Hugo Jaramillo, por darme todo lo necesario para poder persistir a lo largo de mi vida, por su valioso tiempo y por sus palabras de motivación y aliento en los momentos de debilidad y flaqueza. Ustedes son mi motor y motivación para seguir alcanzando mis objetivos de vida y, me encantaría seguir alegrando su corazón y llenándoles de orgullo porque ustedes se lo merecen por ser esos padres maravillosos.

Lizbeth.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a la Escuela Politécnica Nacional por acogerme y forjarme como profesional íntegra, capaz de desarrollar competencias desafiantes en el mundo laboral.

A mis profesores que no solo han sabido transmitir sus conocimientos con paciencia, sino también inspirar en mí el deseo por aprender más y ser mejor cada día.

A mi director de tesis, Ing. Ángel Portilla, Msc., por su confianza para la elaboración del presente trabajo, por sus consejos, recomendaciones y apoyo absoluto durante el desarrollo del mismo.

A mis padres, gracias por su amor tan grande, su apoyo incondicional en todo momento, sus esfuerzos y sacrificios, su motivación constante, los valores que han inculcado en mi persona y que me hacen ser la persona que soy ahora. Todo lo que soy es gracias a ustedes.

A Jonathan, por ser ese compañero único y especial que con su amor me ha motivado a no rendirme y a luchar por mis sueños. Gracias por cada palabra de aliento, por cada abrazo, por cada cariño que me han llenado de felicidad y recargado de energía para continuar. Ha sido un placer coincidir en esta vida.

A todos mis amigos que conocí en la etapa universitaria, en especial a Juan, Les, Sebas, Jaiber, Sofy y Andrés que con cada uno tengo momentos únicos e imborrables de mi memoria; hemos compartido risas, lágrimas que han fortalecido nuestra amistad y nos han hecho ser más unidos. Gracias por cada momento de complicidad durante estos años, gracias porque con ustedes esta etapa fue más bonita y llevadera.

Lizbeth.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos .....	1
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	2
1.4.1. El tratamiento facial, los beneficios y factores que influyen.....	2
1.4.2. Análisis termodinámico en el vaporizador.....	4
1.4.3. Transferencia de calor en el vaporizador.....	6
1.4.4. Efecto Joule.....	10
1.4.5. Elementos que constituyen el vaporizador.....	10
2. METODOLOGÍA .....	13
2.1. Planteamiento del modelo matemático en estado transitorio.....	13
2.1.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección-radiación .....	15
2.1.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección natural .....	15
2.1.3. Coeficiente de transferencia de calor por radiación .....	18
2.2. Planteamiento del modelo matemático en estado estable .....	18
2.3. Determinación de los espesores del aislamiento .....	20
2.4. Determinación de Tso requerido por diseño y seguridad.....	21
2.5. Análisis de costos para la construcción del vaporizador .....	24
3. DIMENSIONAMIENTO, PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	27
3.1. Dimensionamiento.....	27
3.1.1. Requerimientos y restricciones para el vaporizador eléctrico.....	27
3.1.2. Cálculo del coeficiente de convección natural para el recipiente .....	28
3.1.3. Cálculo del coeficiente de radiación en la superficie del recipiente de agua .....	29

3.1.4.	Cálculo del coeficiente de convección-radiación en estado transitorio .....	29
3.1.5.	Dimensiones del recipiente y propiedades termo-físicas del agua .....	30
3.1.6.	Modelo matemático del vaporizador en estado transitorio .....	30
3.1.7.	Cálculo de la energía necesaria para el funcionamiento del equipo en estado estable .....	33
3.1.8.	Dimensionamiento de la resistencia eléctrica .....	40
3.2.	Pruebas .....	42
3.2.1.	Pruebas de funcionalidad .....	42
3.2.2.	Pruebas en condiciones normales de funcionamiento .....	42
3.2.3.	Protocolo de pruebas de funcionalidad .....	42
3.2.4.	Protocolo de pruebas en condiciones normales de funcionamiento .....	44
3.3.	Resultados .....	47
3.3.1.	Pruebas de funcionalidad .....	47
3.3.2.	Pruebas de condiciones normales de funcionamiento .....	48
3.3.3.	Costos para la construcción del vaporizador eléctrico .....	53
3.4.	Conclusiones .....	54
3.5.	Recomendaciones .....	55
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
5.	ANEXOS .....	59

## RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo realizar el diseño térmico, la construcción, el montaje y las pruebas de un vaporizador eléctrico de uso doméstico en estado estable y transitorio. El análisis térmico del equipo en estado transitorio sirve para determinar la potencia de calentamiento. Para esto se plantea un modelo matemático de la temperatura en función del tiempo con ciertos parámetros a considerar como la potencia de la resistencia eléctrica, el coeficiente de convección-radiación y temperaturas de entrada y salida. De este modelo se obtendrán temperaturas y tiempos de calentamiento del proceso de vaporización. Por otro lado, el análisis térmico del vaporizador en estado estable sirve para determinar la potencia de funcionamiento y los espesores de aislamiento en el conducto de transporte de vapor considerando la transferencia de calor, pérdidas y temperaturas superficiales.

Con los resultados del análisis en estado transitorio, se obtuvo que la potencia necesaria para el calentamiento de agua es de 1500 [W] con un tiempo de calentamiento de 4 [min] para 1000 [ml] de agua y con una temperatura de trabajo del equipo de 91 [°C] desde una temperatura inicial de 15 [°C]. Con los resultados del análisis en estado estable, se determinó una potencia de funcionamiento de 100 [W] y una temperatura superficial de 40 [°C] en el conducto de transporte de vapor. De un análisis de costos, el costo total del prototipo del vaporizador eléctrico fue de \$653.

Una vez obtenidos los resultados, se realizó la construcción del vaporizador y se hicieron pruebas tanto de funcionalidad como de las condiciones normales de funcionamiento. Por último, se concluyó que el equipo que se ha diseñado y construido funciona adecuadamente cumpliendo con la generación de vapor. De los datos teóricos se tiene que el agua se calienta en 240 [seg] a 91 [°C] mientras que, con la experimentación el agua se calienta en 340 [seg] a 91 [°C]. Esta variación se debe a que se tomaron valores promedios de las propiedades termo-físicas del agua y del aire, mas no para cada instante de tiempo, también las correlaciones utilizadas para el cálculo del coeficiente de convección tienen una incertidumbre del 10% y, las propiedades consideradas para los materiales no han sido medidas sino tomadas de catálogos. No obstante, esta variación no afecta al funcionamiento del vaporizador eléctrico.

**PALABRAS CLAVE:** vaporizador eléctrico, estado transitorio, estado estable, análisis térmico, resistencia eléctrica.

## ABSTRACT

The objective of this work is to carry out the thermal design, construction, assembly and testing of an electric vaporizer for domestic use in stable and transient states. The thermal analysis of the equipment in transient state serves to determine the heating power. For this, a mathematical model of temperature as a function of time is proposed with certain parameters to consider such as the power of the electrical resistance, the convection-radiation coefficient and inlet and outlet temperatures. Temperatures and heating times of the vaporization process will be obtained from this model. On the other hand, the thermal analysis of the vaporizer in steady state serves to determine the operating power and the insulation thicknesses in the vapor transport duct considering the heat transfer, losses and surface temperatures.

With the results of the transient state analysis, it was obtained that the necessary power for heating water is 1500 [W] with a heating time of 4 [min] for 1000 [ml] of water and with a working temperature of equipment of 91 [°C] from an initial temperature of 15 [°C]. With the results of the steady-state analysis, an operating power of 100 [W] and a surface temperature of 40 [°C] were determined in the vapor transport duct. From a cost analysis, the total cost of the electric vaporizer prototype was \$653.

Once the results were obtained, the construction of the vaporizer was carried out and tests of both functionality and normal operating conditions were carried out. Finally, it was concluded that the equipment that has been designed and built works properly, complying with steam generation. From the theoretical data we have that the water heats up in 240 [sec] to 91 [°C] while, with the experimentation, the water heats up in 340 [sec] to 91 [°C]. This variation is due to the fact that average values of the thermo-physical properties of water and air, but not for each instant of time, also the correlations used to calculate the convection coefficient have an uncertainty of 10% and the properties considered for the materials have not been measures but taken from catalogs. However, this variation does not affect the operation of the electric vaporizer.

**KEYWORDS:** electric vaporizer, transient state, stable state, thermal analysis, electrical resistance.



# **1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO**

Con el propósito de construir el vaporizador eléctrico de uso doméstico, es necesario realizar el diseño térmico del equipo. Para esto, se identificarán los mecanismos de transferencia de calor y principios termodinámicos con el propósito de desarrollar un modelo matemático para evaluar el comportamiento térmico del vaporizador tanto en el estado estable como en el estado transitorio. El resultado del análisis del comportamiento en estas dos condiciones permitirá determinar las pérdidas de calor y la energía necesaria para el proceso de vaporización. En base a esto se dimensionará y seleccionará las resistencias eléctricas para el calentamiento.

Con el dimensionamiento térmico, se procederá a determinar los costos de los materiales para la construcción, montaje del equipo y pruebas de funcionalidad y de condiciones normales de funcionamiento. El trabajo culminará con la elaboración de un manual de usuario del vaporizador eléctrico con el fin de facilitar la operación y mantenimiento del mismo.

## **1.1 Objetivo general**

Diseñar térmicamente, construir, realizar el montaje y pruebas del vaporizador eléctrico de uso doméstico.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Desarrollar el modelo matemático de transferencia de calor del vaporizador.
2. Determinar la potencia necesaria para seleccionar la resistencia eléctrica.
3. Determinar los espesores del aislamiento en el conducto de transporte de vapor.
4. Realizar un análisis de costo del equipo.
5. Construir el vaporizador eléctrico.
6. Realizar un protocolo de pruebas en vacío y carga del vaporizador eléctrico.
7. Realizar pruebas para el vaporizador eléctrico.
8. Elaborar el manual del usuario del equipo.

## **1.3 Alcance**

El vaporizador eléctrico de uso doméstico unipersonal está orientado únicamente al uso terapéutico de los tratamientos faciales con un tiempo máximo de vaporización de 15 [min] aproximadamente y un flujo volumétrico de 60 [ml/min]. Este vaporizador puede ser utilizado en el hogar, en un spa o en un centro terapéutico.

Para lograr el diseño térmico y construcción del sistema de calentamiento y distribución de vapor, se usarán modelos matemáticos termodinámicos y modelos analíticos y empíricos de la transferencia de calor para obtener la energía requerida para evaporar, el dimensionamiento de la resistencia eléctrica y su potencia.

Se realizará un análisis económico del equipo para estimar costos de materiales, de fabricación, entre otros. También, se realizará un protocolo de pruebas para evaluar el funcionamiento del vaporizador en vacío y en carga, efectuando variaciones de flujo y temperatura del vapor. Se elaborará un manual del usuario del vaporizador eléctrico donde se detallan las especificaciones e instrucciones de operación y mantenimiento del equipo.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1. El tratamiento facial, los beneficios y factores que influyen**

Los tratamientos faciales son técnicas no invasivas que se aplican directamente sobre la superficie del rostro y, como resultado se obtienen múltiples beneficios. Un tratamiento facial ayuda a mejorar la salud y la apariencia de la piel ya que realiza cambios favorables en el tejido de la piel. Las aplicaciones más importantes de los tratamientos faciales son [1]:

- Limpiar a fondo el cutis
- Renovar las células
- Rejuvenecer la piel
- Desaparecer manchas

Además, para realizar un tratamiento facial se necesita la aplicación del vapor para que los poros de la piel se expandan y la piel pueda receptar los nutrientes adquiridos en esencias como los aceites esenciales.

## Beneficios de la aplicación de vapor

Los beneficios de la aplicación de vapor en la piel son varios como la limpieza de los poros, purificación de la piel, aportación de luminosidad, entre otros [2]. El vapor que sale a cierta temperatura “activa el riego sanguíneo y facilita la posterior higiene sin dañar la epidermis y la dermis” [2] [3].

Según Cristina Galmiche, el vapor actúa como un exfoliante enzimático y ayuda a contrarrestar los signos del envejecimiento. Además, “el vapor facial ayuda a aumentar la hidratación de la capa externa de la piel, ya que mejora la penetración de los ingredientes activos, proporciona luminosidad y un efecto calmante” [2].

## Factores que intervienen en el tratamiento facial

Para poder beneficiarse de todos los beneficios mencionados anteriormente de una manera óptima, se debe tomar en cuenta ciertos factores que intervienen directamente en un tratamiento facial. Estos son:

- Distancia y tiempo recomendado
- Flujo volumétrico de confort

Es importante que entre el difusor y el rostro de la persona se mantenga una distancia óptima y a la vez, se aplique un tiempo adecuado para un correcto tratamiento facial. Si no se aplica a una distancia recomendada se corre el peligro de quemar la zona expuesta debido al vapor saliente. También, el tiempo varía según el tipo de piel de la persona que se realiza el tratamiento facial. Datos referentes a estos parámetros, se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Distancias óptimas y tiempos recomendados según el tipo de piel [3].

Tipo de piel	Distancia [cm]	Tiempo [min]
Piel grasa, mala circulación sanguínea	30	15
Piel normal	30	10
Piel sensible, piel seca	30	5
Expansión de los vasos capilares	30	5

Por otro lado, el flujo volumétrico es el indicador esencial para medir el confort que el usuario del vaporizador facial experimenta durante su uso. Para obtener este parámetro se realizó un análisis de mercado benchmarking, obteniendo los valores de flujo volumétrico de confort de 5 vaporizadores faciales en el mercado, como se muestra en la Tabla 2. El promedio de estos 5 valores se utilizará como base para la selección de este parámetro de diseño.

**Tabla 2.** Flujo volumétrico calculados de algunos vaporizadores faciales de pedestal

Nº	Volumen [ml]	Tiempo de vaporización [min]	Flujo Volumétrico [ml/min]
1 [4]	1146,7	15	76,45
2 [5]	1182,5	15	78,83
3 [6]	600,0	10	60,00
4 [7]	700,0	15	46,67
5 [5]	700,0	15	46,67
		<b>PROMEDIO</b>	61,73

Por lo tanto, el flujo volumétrico controlable y óptimo a considerar es 60 [ml/min].

#### 1.4.2. Análisis termodinámico en el vaporizador

Se requiere hacer un análisis termodinámico al vaporizador. Para esto se debe considerar diferentes tipos de calor, vapor y mezclas.

##### Calor sensible

Es el calor que provoca un cambio de temperatura en una sustancia. Por ejemplo, si se tiene un vaso de agua líquida a 0 [°C] y se quiere subir su temperatura hasta los 20 [°C], se añadirá una cierta cantidad de calor; este calor que provocará esta subida de temperatura es el calor sensible [8].

Se cuantifica el calor sensible mediante la ecuación 1:

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

**Ecuación 1:** Calor sensible [9]

*Donde:*

*q:* energía necesaria para el calentamiento de la carga [J]

*m:* masa de la carga [kg]

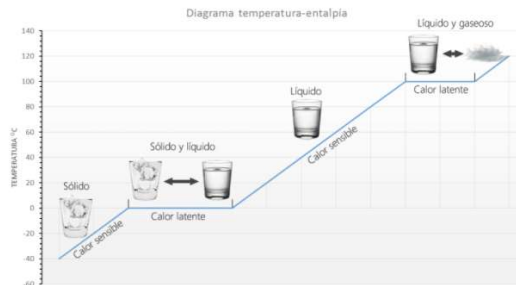
*C<sub>p</sub>:* calor específico de la carga  $\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$

*ΔT:* Diferencia de temperaturas en la carga [K]

##### Calor latente

Es el calor añadido o eliminado de una sustancia que provoca un cambio de estado en el mismo. Este calor no provoca un cambio de temperatura, es decir su temperatura es constante dentro de este cambio de estado. Por ejemplo, un vaso de agua líquida a 0 [°C] se quiere cambiar a agua sólida (hielo), se debe extraer una cierta cantidad de calor para

cambiar su estado; este calor necesario es el calor latente. Como resultado se tiene el agua en estado sólido y a la misma temperatura de 0 [°C] [8]. A continuación, se muestra la Figura 1 donde se distingue la diferencia entre el calor sensible y el calor latente para el agua.



**Figura 1:** Calor sensible y calor latente según la temperatura [8]

### Calor latente de vaporización

El calor latente de vaporización es la cantidad de energía necesaria para transformar un gramo de una sustancia líquida en gas a temperatura constante.

El calor de vaporización del agua es alrededor de 540 [cal/g] a 100 °C, el punto de ebullición del agua a 1 [atm] de presión. Algunas moléculas de agua, las que tengan una energía cinética alta, escaparán de la superficie del agua [10].

### Mezcla saturada, vapor saturado y vapor sobrecalentado

En la naturaleza existen situaciones en que una sustancia pura puede estar en dos fases coexistiendo en equilibrio [11]. El agua es una de estas sustancias que puede existir ya sea como líquido saturado, como líquido y vapor o como vapor sobrecalentado.

Para comprender el comportamiento de una sustancia pura se muestra la Figura 2, el cual es un diagrama termodinámico temperatura vs volumen específico.



**Figura 2:** Diagrama termodinámico temperatura vs volumen específico [11]

En la Figura 2 se observan tres regiones: la región de líquido comprimido, la región saturada líquido-vapor y la región de vapor sobrecalentado. Esta campana está formada por los puntos de líquido saturado y vapor saturado que pueden variar según la presión para una misma sustancia pura [11].

### 1.4.3. Transferencia de calor en el vaporizador

Los mecanismos de transferencia de calor que están presentes en el vaporizador eléctrico son: la conducción, la convección, la radiación, evaporación y ebullición.

#### Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a su interacción con las mismas. Se habla entonces, de la transferencia de energía provocado por el movimiento molecular aleatorio [9]. En otras palabras, la conducción es la transferencia de calor entre dos puntos de un cuerpo a diferentes temperaturas sin producirse transferencia de materia entre ellos [12] como se muestra en la Figura 3.

Mediante la ley de Fourier, se cuantifica la cantidad de energía transferida por conducción y se muestra en la ecuación 1:

$$q_{cond} = -k * \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

**Ecuación 2:** Transferencia de calor por conducción [9]

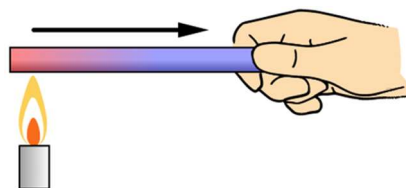
Donde:

$q_{cond}$ : flujo de calor por conducción [W]

$k$ : conductividad térmica del material  $\left[\frac{W}{mk}\right]$

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ : gradiente de temperatura [ $^{\circ}C/m$ ]

El signo menos en la ecuación 2 indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura [9].

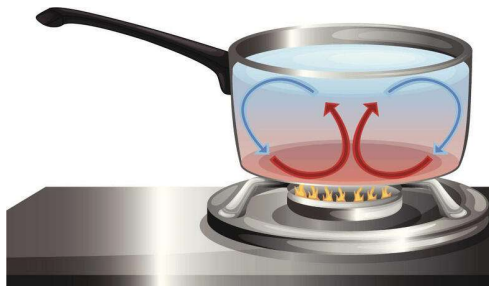


**Figura 3.** Transferencia de calor por conducción [12]

## Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de conducción y movimiento del fluido [13].

“Hay convección forzada si el fluido es forzado a fluir en un tubo como un ventilador. En cambio, se trata de convección libre si el movimiento del fluido es ocasionado por las fuerzas de flotación inducidas por diferencias de densidad” [13]. En la Figura 4 se muestra la transferencia de calor por convección en una olla sometida a calor:



**Figura 4:** Transferencia de calor por convección [14]

Mediante la ley de enfriamiento de Newton, se cuantifica la cantidad de energía transferida por convección y se muestra en la ecuación 3:

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

**Ecuación 3:** Transferencia de calor por convección [9]

*Donde:*

$q_{conv}$ : flujo de calor por convección [W]

$h$ : coeficiente de convección  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

$A$ : área de la superficie [ $m^2$ ]

$T_s$ : temperatura de la superficie [K]

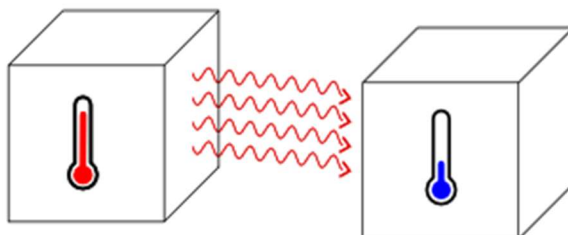
$T_{\infty}$ : temperatura ambiente [K]

## Radiación

La radiación es la energía que emite la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Este tipo de transferencia de calor no requiere la presencia de un medio. De hecho, este tipo de transferencia es la más rápida (se lleva a cabo a la velocidad de la luz)

y no experimenta ninguna atenuación en el vacío. Éste es exactamente el modo como la energía del Sol llega a la Tierra [15].

“La radiación térmica puede ser descrita como el transporte de energía a través de ondas electromagnéticas o de paquetes de energía que no contienen masa, llamados fotones” [15]. En la Figura 5 se muestra la transferencia de calor por radiación:



**Figura 5:** Transferencia de calor por radiación [16]

Mediante la Ley de Stefan-Boltzmann, se cuantifica la cantidad de energía transferida por radiación y se muestra en la ecuación 4:

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

**Ecuación 4:** Transferencia de calor por radiación [5]

Donde:

$q_{rad}$ : flujo de calor por radiación [W]

$\varepsilon$ : emisividad de la superficie, entre 0 y 1

$A$ : área de la superficie [ $m^2$ ]

$\sigma$ : constante de Stefan – Boltzmann,  $5.67 * 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$

$T_s$ : temperatura de la superficie [K]

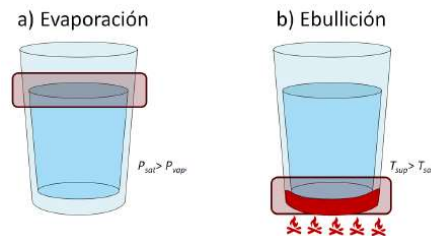
$T_{sur}$ : temperatura de los alrededores [K]

### Evaporación y ebullición

La evaporación se realiza en la interfase líquido-vapor cuando la presión de vapor es menor que la presión de saturación del líquido a una temperatura dada como se muestra en la Figura 6a). Por ejemplo, el agua de un lago a 20 [°C] se evapora hacia el aire a 20 [°C] y 60% de humedad relativa, ya que la presión de saturación del agua a 20 °C es 2.34 [kPa], y la de vapor del aire a la misma temperatura y 60% de humedad relativa es 1.4 [kPa] [15].



Por otra parte, la ebullición se realiza en la interfase sólido-líquido cuando la temperatura del sólido del recipiente es mayor que la temperatura de saturación del líquido a una presión dada como se muestra en la Figura 6b). Por ejemplo, en una olla que se utiliza para hervir agua, la hornilla calentará la superficie inferior del recipiente llevando al agua al punto de ebullición [13].



**Figura 6.** a) Interfaz líquido-vapor en evaporación y b) Interfaz sólido-líquido en ebullición. [13]

Considerando que la ebullición es un caso especial de la convección, se realiza un cambio en las variables involucradas dentro de la ley de enfriamiento de Newton como se muestra en la ecuación 5:

$$q_{\text{ebullición}} = h_{\text{eb}} * (T_s - T_{\text{sat}})$$

**Ecuación 5:** Transferencia de calor por ebullición [13]

Donde:

$q_{\text{ebullición}}$ : flujo de calor por unidad de área [ $W/m^2$ ]

$h_{\text{eb}}$ : coeficiente convectivo [ $W/m^2K$ ]

$T_s$ : temperatura de la superficie [ $K$ ]

$T_{\text{sat}}$ : temperatura desaturación [ $K$ ]

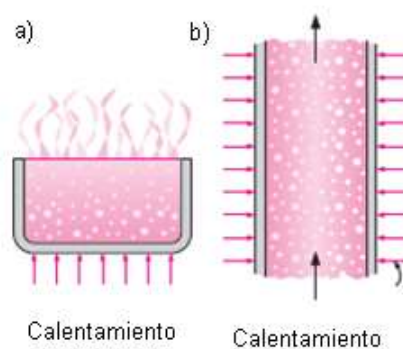
### Tipos de ebullición

Los tipos de ebullición se definen según el medio en el que sucede el cambio de fas y, son dos: ebullición de estanque y ebullición de flujo.

La ebullición de estanque o alberca se presenta cuando el fluido se encuentra estático en el recipiente donde se produce la ebullición. Entonces, la película de fluido más cercana a la superficie se calienta y por diferencia de densidades comienza a subir produciendo bucles de convección con las capas superiores de fluido. Por ejemplo, una olla sometida a

calor sufre ebullición de estanque ya que las partículas se mueven por las corrientes inducidas de la convección mas no por un flujo inducido como se muestra en la Figura 7a).

La ebullición de flujo, también denominada ebullición en convección forzada, el fluido es forzado a moverse a través de una tubería caliente o sobre una superficie a través de medios externos como una bomba centrífuga. Por ejemplo, una tubería de cobre que es calentada de tal manera que “al inicio de la tubería entra agua líquida y al final sale vapor de agua; es decir que, la ebullición sucedió a lo largo de la tubería” [13] como se muestra en la Figura 7b).



**Figura 7.** a) Ebullición de estanque o alberca b) Ebullición de flujo [9].

#### **1.4.4. Efecto Joule**

El efecto Joule es el desprendimiento de calor provocado por el movimiento de electrones. Este es un proceso que prevalece en productos como las estufas, calefactores, termos, secadores o incluso las vitro-cerámicas. Este efecto permite convertir la energía eléctrica en calor. Por ejemplo, en el caso de los secadores se encuentran una serie de resistencias que se calientan con el paso de la corriente eléctrica, calentando así el aire que expulsa al exterior [17].

#### **1.4.5. Elementos que constituyen el vaporizador**

El vaporizador eléctrico facial consta de 3 módulos: sistema de almacenamiento y distribución, sistema eléctrico y electrónico y sistema de soporte estructural. A continuación, se presentan los elementos que estarán inmersos en el calentamiento de la carga para el vaporizador.

#### **Resistencias eléctricas de calentamiento para inmersión**

Estas resistencias están diseñadas para el calentamiento en contacto directo con un fluido, ya sea agua, aceite, materiales viscosos, disoluciones ácidas o básicas, entre otras.

El rendimiento energético es máximo, debido a que todo el calor se transporta al fluido ya que está en contacto con la resistencia. Estos elementos tienen varias opciones de acoplamiento al depósito donde se las colocan; por ejemplo, mediante tapón roscado, con brida, o con racores [18].

Además, estas resistencias de inmersión tubulares están configuradas como un conjunto de tubos en forma de "J", en forma de "U" o en forma de espiral [18] como se muestra en la Figura 8.



**Figura 8.** Resistencia eléctrica para inmersión en forma de espiral, tubular y tipo J [18]

Las resistencias eléctricas para calentar agua se dividen en tres grandes grupos, de acuerdo con su configuración, tipo de ajuste y de forma [19]. Estas son:

- Resistencias eléctricas verticales
- Resistencias eléctricas de cabezal tipo rosca
- Resistencias eléctricas con bridas

### **Conductores**

Son aquellos elementos que facilitan el paso del flujo de electrones; es decir, el paso de la corriente. La mayoría de los conductores son metálicos, puesto a que presentan buenas propiedades de conductividad. Por ejemplo, entre los materiales más utilizados están el cobre, el aluminio, el bronce, la plata, el platino e hilos finos de oro (que se utilizan en circuitos integrados que se pueden encontrar en el mercado).

Además, la selección de los conductores depende de la ampacidad, que es una propiedad de conducción continua de corriente, en base a ciertas condiciones, como el calibre y la temperatura ambiente. El calibre está especificado según la normalización AWG (American Wire Gauge); mientras que, la numeración está especificada de acuerdo con la utilización. En la Tabla 3, se presentan las numeraciones más comunes [20].

**Tabla 3:** Aplicaciones de los conductores de acuerdo con la numeración AWG [20]

<b>Número</b>	<b>Utilización</b>
6	Para acometidas en pequeña industria y talleres.
8	Acometidas residenciales grandes o edificios pequeño.
10	Duchas y en aplicaciones domésticas
12	Instalaciones internas y externas domésticas
14	Tableros eléctricos e instalaciones domésticas de hasta 400 [W]
16	Tableros elementales de 200[W]
18	Circuitos de fuentes DC
20	Instalación de antenas de TV y radio
22	Instalaciones telefónicas.

### **Fusibles**

Son dispositivos eléctricos de protección. Su función es interrumpir el paso de la corriente eléctrica cuando se presentan sobrecargas excesivas; para lograr esto el fusible se funde. Estos dispositivos están compuestos por una lámina y un filamento de aleación metálica con bajo punto de fusión; generalmente, de estaño.

La ubicación de estos elementos debe ser estratégica de tal manera que pueda proteger tanto a los conductores como a los dispositivos que se quiere evitar averías o incendios. Entre los principales tipos de fusible, se encuentran los cilíndricos, los de cuchillas, los de pastilla, los de chicote, cartucho, de plomo, entre otros [21].

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se procede a realizar el análisis térmico del vaporizador en estado estable y transitorio, comenzando desde el desarrollo de los modelos matemáticos para el cálculo tanto de la potencia requerida de calentamiento para un tiempo adecuado y la de funcionamiento durante el tiempo de tratamiento hasta la determinación de los espesores del aislamiento a utilizar.

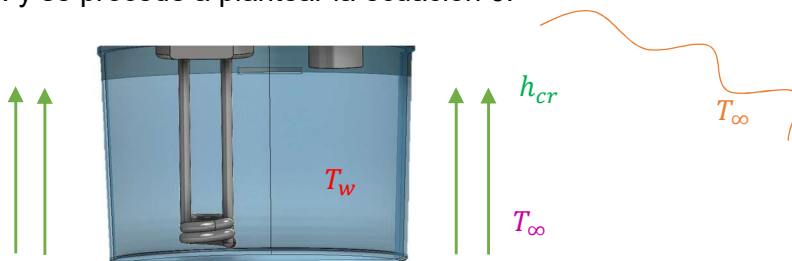
Este tipo de trabajo es teórico y, se desarrollará dos modelos matemáticos; uno en el cual se calcula la potencia que se necesita suministrar para el calentamiento del agua desde una temperatura ambiente hasta su temperatura de saturación y, otro en el cual se calcula la potencia de funcionamiento considerando el calor latente de vaporización, las pérdidas en el recipiente y las pérdidas en el conducto de transporte de vapor agua.

El análisis térmico del vaporizador en estado transitorio sirve para determinar la potencia de calentamiento. Para esto se plantea la primera ley de la termodinámica encontrando así, una ecuación de la temperatura en función del tiempo con ciertos parámetros a considerar como la potencia de la resistencia eléctrica, el coeficiente de convección-radiación y temperaturas de entrada y salida.

Por otro lado, el análisis térmico del vaporizador en estado estable sirve para determinar la potencia de funcionamiento y los espesores de aislamiento en el conducto de transporte del agua considerando la transferencia de calor, pérdidas y temperaturas superficiales.

### 2.1. Planteamiento del modelo matemático en estado transitorio

Se realiza el análisis térmico en estado transitorio para un cilindro que contiene agua como se muestra en la Figura 9. y se procede a plantear la ecuación 6:



**Figura 9:** Esquema del recipiente de agua del vaporizador

$$\dot{E}_{en} + \dot{E}_g = \dot{E}_{sal} + \dot{E}_a$$

**Ecuación 6:** Ecuación de la 1era ley de la termodinámica [13].

Donde:

$\dot{E}_{en}$ : energía que entra al sistema [W]

$\dot{E}_g$ : energía generada en el sistema [W]

$\dot{E}_{sal}$ : energía que sale del sistema [W]

$\dot{E}_a$ : energía almacenada en el sistema [W]

En el estado transitorio del vaporizador se tiene energía que entra, que sale y la energía almacenada. La energía que entra al sistema es producida por la potencia de la resistencia eléctrica y se muestra en la ecuación 7:

$$\dot{E}_{en} = P_{el}$$

**Ecuación 7:** Energía de entrada al vaporizador

Donde:

$\dot{E}_{en}$ : energía que entra al sistema [W]

$P_{el}$  = Potencia eléctrica de la resistencia eléctrica [W]

La energía de almacenamiento se debe a la energía de calentamiento de agua y se muestra en la ecuación 8:

$$\dot{E}_{al} = \rho_w * V_w * C_{p_w} * \frac{dT_w}{dt}$$

**Ecuación 8:** Energía almacenada en el vaporizador [13]

Donde:

$\dot{E}_{en}$ : energía almacenada en el sistema [W]

$\rho_w$ : densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$V_w$ : volumen del agua [m<sup>3</sup>]

$C_{p_w}$ : calor específico del agua [J/kg \* K]

$\frac{dT_w}{dt}$ : derivada de la temperatura en función del tiempo [K/s]

La energía de salida se debe a la convección y radiación entre el recipiente, el ambiente y alrededores; se muestra en la ecuación 9:

$$\dot{E}_{sal} = h_{cr} * A_{cr} * (T_w - T_{\infty})$$

**Ecuación 9:** Energía que sale del vaporizador [13]

Donde:

$\dot{E}_{sal}$ : energía que sale del sistema [W]

$h_{cr}$ : coeficiente de transferencia de calor por convección – radiación  $\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$

$A_{cr}$ : área de convección – radiación [ $m^2$ ]

$T_w$ : temperatura final del agua [ $^{\circ}C$ ]

$T_{\infty}$ : temperatura inicial del agua, temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]

### 2.1.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección-radiación

Las paredes del vaporizador tienen transferencia de calor por convección y también por radiación. Se utiliza el coeficiente de convección-radiación cuando la temperatura del ambiente es igual a la temperatura de los alrededores. En estos casos se utiliza la ecuación 10:

$$h_{cr} = h_{conv} + h_{rad}$$

**Ecuación 10:** Coeficiente de transferencia de calor por convección-radiación [13]

Donde:

$h_{cr}$ : coeficiente de transferencia de calor por convección – radiación [ $W/m^2K$ ]

$h_{conv}$ : coeficiente de transferencia de calor por convección [ $W/m^2K$ ]

$h_{rad}$ : coeficiente de transferencia de calor por radiación [ $W/m^2K$ ]

Al reemplazar las ecuaciones 7,8 y 9 en la ecuación 6 se obtiene el modelo matemático en estado transitorio para el vaporizador como se muestra en la ecuación 11:

$$dT_w = \left( \frac{P_{el} - h_{cr} * A_{cr} * (T_w - T_{in})}{\rho_w * V_w * C p_w} \right) * dt$$

**Ecuación 11:** Modelo matemático del vaporizador en estado transitorio

Con la ecuación 11 se determinará la potencia necesaria y el tiempo de calentamiento del agua hasta su punto de ebullición; esto permitirá seleccionar la resistencia eléctrica requerida en estado transitorio.

### 2.1.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección natural

El coeficiente de transferencia de calor por convección natural depende de algunas “condiciones en la capa límite, la naturaleza del movimiento del fluido y de propiedades

termodinámicas del fluido y de transporte” [13]. Para calcular el coeficiente de convección de calor se emplea la ecuación 12:

$$h_{conv} = \frac{Nu_D * k}{D}$$

**Ecuación 12:** Coeficiente de transferencia de calor por convección [13]

Donde:

$Nu_D$ : número de Nusselt

$k$ : conductividad térmica del fluido [W/mK]

$D$ : diámetro donde circula el fluido [m]

En la ecuación 12 se toma en cuenta el diámetro en vez de la longitud cuando el diámetro de la geometría es mayor que la altura del mismo.

- **Número de Nusselt**

El número de Nusselt es otro de los números empleados para la obtención del coeficiente de convección y es la medida de transferencia de calor por convección en la superficie de una geometría [22]. El cálculo del número de Nusselt depende si:

- $Ra_D \leq 10^{12}$  se utiliza la ecuación 13:

$$Nu_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 * Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

**Ecuación 13:** Número de Nusselt para flujo laminar [13]

Donde:

$Nu_D$ : número de Nusselt

$Ra_D$ : número de Rayleigh

$Pr$ : número de Prandtl

- **Número de Prandtl**

El número de Prandtl es otro de los números que se utiliza para el cálculo del coeficiente de calor por convección y es la relación entre la distribución de la velocidad y temperatura y se lo calcula mediante la ecuación 14:

$$Pr = \frac{\mu * Cp}{k}$$

**Ecuación 14:** Número de Prandtl [13]

Donde:



$\mu$ : viscosidad dinámica [Pa \* s]  
 $C_p$ : calor específico [J/kg \* K]  
 $k$ : conductividad térmica [W/m \* K]

- **Número de Rayleigh**

El número de Rayleigh es uno de los números adimensionales que se puede emplear para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección. Este número se lo muestra en la ecuación 15:

$$Ra_D = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * D^3}{\nu * \alpha}$$

**Ecuación 15:** Número de Rayleigh [13]

Donde:

$Ra_D$ : número de Rayleigh  
 $g$ : gravedad de la Tierra [ $m/s^2$ ]  
 $\beta$ : coeficiente de expansión [1/K]  
 $T_s$ : temperatura de la superficie [K]  
 $T_\infty$ : temperatura ambiente [K]  
 $D$ : diametro de la geometría [m]  
 $\nu$ : viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ]  
 $\alpha$ : difusividad térmica [ $m^2/s$ ]

Además, el número de Rayleigh determina la naturaleza del movimiento del fluido, es decir, si es laminar o turbulento. El fluido es laminar cuando  $Ra_D \leq 10^{12}$  y es turbulento cuando  $Ra_D > 10^{12}$  [13].

- **Propiedades termo-físicas del aire**

Para el diseño del vaporizador se considera aire en convección natural y se debe establecer las propiedades termo-físicas del aire. Es importante mencionar que el coeficiente de convección está en función de números adimensionales, los cuales dependen de estas propiedades termo-físicas. Las propiedades deber ser calculadas a la temperatura de película, es decir, a la temperatura promedio entre la temperatura de la superficie y la temperatura de ambiente.

La temperatura de película se la calcula mediante la ecuación 16:

$$T_f = \frac{T_s + T_{sur}}{2}$$

**Ecuación 16:** Temperatura de película del fluido [13]

Donde:

$T_f$ : temperatura de película [K]

$T_s$ : temperatura superficial [K]

$T_{sur}$ : temperatura de alrededores [K]

### 2.1.3. Coeficiente de transferencia de calor por radiación

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por radiación se utiliza la ecuación 17:

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_{sur}) * (T_s^2 + T_{sur}^2)$$

**Ecuación 17:** Coeficiente de transferencia de calor por radiación [13]

Donde:

$h_{rad}$ : coeficiente de transferencia de calor por radiación [ $W/m^2K$ ]

$\varepsilon$ : emisividad de la superficie, entre 0 y 1

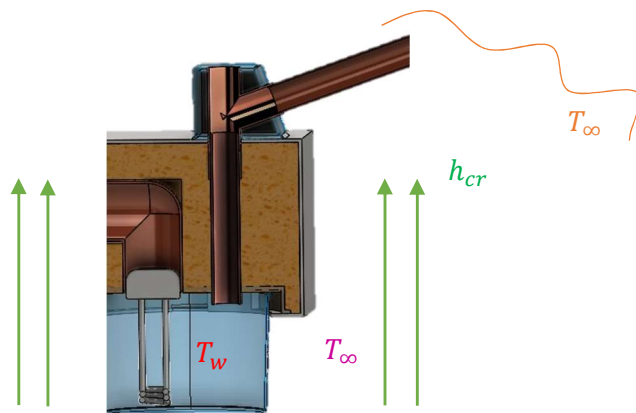
$\sigma$ : constante de Stefan – Boltzmann,  $5.67 * 10^{-8}$  [ $W/m^2K^4$ ]

$T_s$ : temperatura de la superficie [K]

$T_{sur}$ : temperatura de los alrededores [K]

## 2.2. Planteamiento del modelo matemático en estado estable

Se realiza el análisis térmico en una etapa del proceso en el cual ya se ha alcanzado la temperatura de saturación del agua y se requiere vapor con una calidad determinada que se produzca dentro del tiempo que dure el tratamiento facial; a este periodo se lo denomina estado estable. Este análisis toma en cuenta el recipiente de agua, la resistencia eléctrica y el conducto de transporte de vapor en el vaporizador y se muestra en la Figura 10.



**Figura 10:** Esquema del recipiente del agua y el conducto de transporte de vapor [23]

Para esto, se utiliza la ecuación de la primera ley de la termodinámica, ecuación 6. En el estado estable del vaporizador se tiene energía que entra y que sale del sistema. La energía que entra al sistema es producida por la potencia de la resistencia eléctrica para mantener al agua caliente. La energía que sale del vaporizador es ocasionada por las pérdidas en el recipiente, ecuación 18, las pérdidas en el conducto donde se transporta el vapor, ecuación 19 y la energía para vaporizar el agua hasta la calidad requerida, ecuación 20:

$$q_r = h_{cr} * A_{cr} * (T_w - T_\infty)$$

**Ecuación 18:** Energía que sale por el recipiente del vaporizador [13]

*Donde:*

$q_r$ : energía que sale por el recipiente del vaporizador [W]

$h_{cr}$ : coeficiente de convección – radiación  $\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$

$A_{cr}$ : área de convección – radiación [m<sup>2</sup>]

$T_w$ : temperatura final del agua [°C]

$T_\infty$ : temperatura inicial del agua, temperatura ambiente [°C]

$$q_c = h_{cr} * A_{cr} * (T_{so} - T_\infty)$$

**Ecuación 19:** Energía que sale por el conducto de transporte de vapor [13]

*Donde:*

$q_c$ : energía que sale por el conducto de transporte de vapor [W]

$T_{so}$ : Temperatura de la superficie exterior [K]

$$q_L = \dot{m}_v * (h_L - h_f)$$

**Ecuación 20:** Calor latente de vaporización [9]

*Donde:*

$q_L$ : Calor latente de vaporización [W]

$\dot{m}_v$ : flujo másico del vapor  $\left[ \frac{kg}{s} \right]$

$h_L$ : entalpía de la mezcla  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

$h_f$ : entalpía del líquido saturado  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

El flujo másico del vapor se puede calcular con la ecuación 21:

$$\dot{m}_v = \rho_{vapor} * \frac{V_w}{t}$$

**Ecuación 21:** Flujo másico del vapor [9]

Donde:

$\rho_{vapor}$ : densidad del vapor [ $kg/m^3$ ]

$V_w$ : volumen del agua [ $m^3$ ]

$t$ : tiempo de vaporización [ $s$ ]

Para determinar la entalpía de la mezcla se debe considerar vapor húmedo con cierta calidad para un adecuado tratamiento facial.

Reemplazando la ecuación 18, 19 y 20 en la ecuación 6 se obtiene la ecuación 22 que muestra la potencia requerida en estado estable:

$$P_{el} = q_r + q_c + q_L$$

**Ecuación 22:** Potencia eléctrica requerida en estado estable

Donde:

$P_{el2}$ : potencia requerida en estado estable [ $W$ ]

$q_r$ : energía que sale por el recipiente del vaporizador [ $W$ ]

$q_c$ : energía que sale por el conducto de transporte de vapor [ $W$ ]

$q_L$ : Calor latente de vaporización [ $W$ ]

### 2.3. Determinación de los espesores del aislamiento

Para determinar los espesores del aislamiento, se realiza el estudio de la transferencia de calor en estado estable a lo largo del conducto que transporta el vapor, se debe considerar los siguientes requerimientos:

- Temperatura de la superficie interior del aislamiento ( $T_{si}$ )
- Temperatura de la superficie exterior del aislamiento ( $T_{so}$ )
- Temperatura ambiente promedio en la ciudad de Quito ( $T_{\infty}$ )

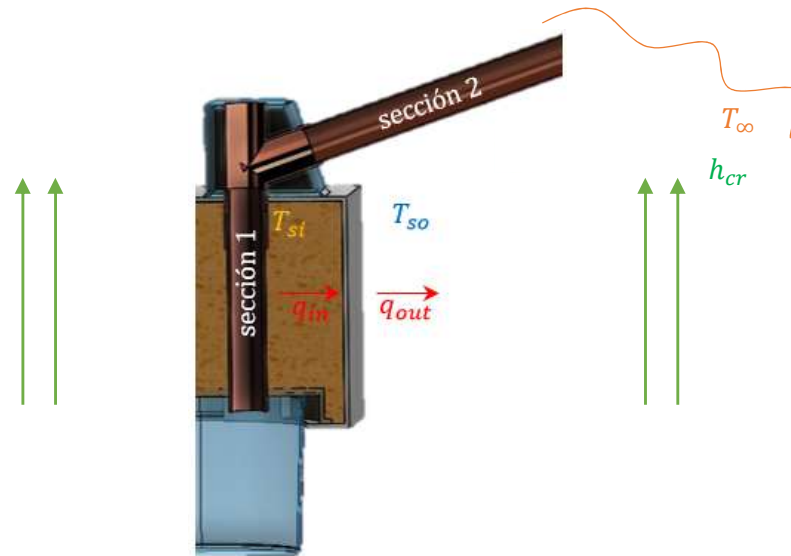
Para establecer los espesores de aislamiento en cada sección del conducto debe cumplirse que su temperatura exterior sea una temperatura que no produzca quemaduras en la piel. En la Tabla 4, se muestran los requerimientos de temperaturas para el análisis térmico del vaporizador en estado estable.

**Tabla 4:** Requerimiento de temperaturas en estado estable [Fuente: propia]

Datos					
$T_{si}$		$T_{so}$		$T_{\infty}$	
91 [°C]	364 [K]	40 [°C]	313 [K]	15 [°C]	288 [K]

## 2.4. Determinación de $T_{so}$ requerido por diseño y seguridad

Para obtener la temperatura superficial externa requerida por diseño y seguridad se realiza un balance de energía en la pared del vaporizador mostrado en la Figura 11.



**Figura 11:** Esquema de la pared del vaporizador [Fuente: propia]

Usando la ecuación 6 en la pared del vaporizador, se tiene la ecuación 235:

$$q_{in} = q_{out}$$

**Ecuación 23:** Balance de energía en la pared del vaporizador

Donde:

$q_{in}$ : flujo de calor que entra a la pared [W]

$q_{out}$ : flujo de calor que sale de la pared [W]

- **Analogía termoeléctrica**

Existe una analogía termoeléctrica que se basa en una semejanza entre las variables relacionadas a cálculos para los circuitos eléctricos y las relacionadas a cálculos para la transferencia de calor como se muestra en la ecuación 24:

$$q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

**Ecuación 24:** Analogía termoeléctrica

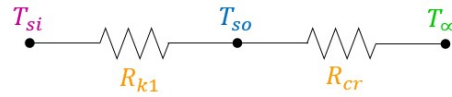
Donde:

$q$ : flujo de calor [W]

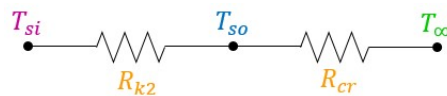
$\Delta T$ : diferencia de temperaturas [K]

$R_t$ : resistencia térmica [K/W]

A continuación, se presenta un esquema de las resistencias térmicas presentes en la pared del vaporizador en la Figura 12 y un esquema de las resistencias térmicas en la sección 2 del conducto de transporte de vapor en la Figura 13:



**Figura 12:** Esquema de las resistencias térmicas en la pared del vaporizador [Fuente: Propia]



**Figura 13:** Esquema de las resistencias térmicas en la sección 2 del conducto de transporte de vapor [Fuente: propia]

Al reemplazar la ecuación 24 en la ecuación 23, se obtiene la ecuación 25 que garantiza resultados óptimos en el cálculo de las temperaturas y los espesores del aislamiento.

$$\frac{T_{si} - T_{so}}{R_k} = \frac{T_{so} - T_{\infty}}{R_{cr}}$$

$$T_{so} = \frac{R_{cr} * T_{si} + R_k * T_{\infty}}{R_{cr} + R_k}$$

**Ecuación 25:** Temperatura superficial externa requerida por diseño y seguridad

Donde:

$T_{so}$ : temperatura superficial externa [K]

$T_{si}$ : temperatura superficial interna [K]

$T_{\infty}$ : temperatura promedio de Quito [K]

$R_{cr}$ : resistencia térmica de convección – radiación [K/W]

$R_k$ : resistencia térmica por conducción [K/W]

- **Resistencia térmica de conducción**

El flujo de calor por conducción se da a través de la pared del conducto que transporta el vapor, el cual está compuesto por el material aislante y se calcula mediante la ecuación 26:

$$R_k = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * k * L}$$

**Ecuación 26:** Resistencia térmica por conducción para un cilindro [13]

Donde:

$R_k$ : resistencia térmica por conducción [K/W]

$r_2$ : radio exterior [m]

$r_1$ : radio interior [m]

$k$ : conductividad del material [W/mK]

$L$ : longitud de la geometría [m]

Debido a que el conducto de transporte de vapor tiene dos secciones se tiene dos longitudes diferentes y, por tanto, las resistencias de conducción para cada sección del conducto se calculan con las ecuaciones 27 y 28 respectivamente:

$$R_{k1} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * k * L_{vert}}$$

**Ecuación 27:** Resistencia térmica de conducción en la sección 1 del conducto

$$R_{k2} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * k * L_{ho}}$$

**Ecuación 28:** Resistencia térmica de conducción en la sección 2 del conducto

- **Resistencia térmica de convección**

El flujo de calor por convección se debe a que la superficie del vaporizador está expuesta al aire del ambiente y se calcula mediante la ecuación 29:

$$R_c = \frac{1}{h_{conv} * A_c}$$

**Ecuación 29:** Resistencia térmica de convección [13]

Donde:

$R_c$ : resistencia térmica de convección [K/W]

$h_{conv}$ : coeficiente de convección [W/m<sup>2</sup>K]

$A_c$ : área de convección [m<sup>2</sup>]

Para determinar el coeficiente de convección se utiliza las ecuaciones mencionadas en el apartado 2.1.2 del presente informe.

- **Resistencia térmica de radiación**

El flujo de calor por radiación se debe al transporte de energía a través de las ondas electromagnéticas y se calcula mediante la ecuación 30:

$$R_r = \frac{1}{h_{rad} * A_r}$$

**Ecuación 30:** Resistencia térmica de radiación [13]

Donde:

$R_r$ : resistencia térmica de radiación  $\left[\frac{K}{W}\right]$

$h_{rad}$ : coeficiente de radiación  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

$A_r$ : área de radiación  $[m^2]$

Para determinar el coeficiente de radiación se utiliza las ecuaciones mencionadas en el apartado 2.1.3 del presente informe.

- **Resistencia térmica de convección-radiación**

Debido a que la superficie del vaporizador está expuesta a convección y radiación, el área de convección y el de radiación van a ser los mismos y, por tanto, las áreas de las resistencias térmicas de convección y de radiación son las mismas. De esta manera, se pueden reducir las ecuaciones 29 y 30 a la ecuación 31:

$$R_{cr} = \frac{1}{h_{conv} * A_{conv}} + \frac{1}{h_{rad} * A_{rad}}$$

**Ecuación 31:** Resistencia térmica de convección-radiación

## 2.5. Análisis de costos para la construcción del vaporizador

Para el análisis de costos se consideran los siguientes tipos de costos:

- Costos de elementos normalizados ( $C_{EN}$ )

Se determina mediante cotizaciones, proformas del elemento normalizado que se requiera o de revisiones en línea de los precios en sitios web de las empresas y va a depender de las condiciones de mercado [24].

- Costos de materia prima ( $C_{MP}$ )

Para el cálculo de este costo es necesario identificar las dimensiones en bruto de tubos, ejes y/o planchas a emplear. El coste de cada pieza en bruto se determina mediante cotizaciones [24].

Otra manera de estimar este costo es una función del peso del material y se lo determina con la ecuación 32:



$$\text{Costo pieza} = \text{Peso} * \text{costo unitario}$$

**Ecuación 32:** Costo de una pieza en función del peso del material [24]

- Costos de fabricación ( $C_F$ )

Para el cálculo es necesario conocer el tiempo de fabricación de cada pieza y el costo de hora hombre-máquina y se calcula mediante la ecuación 33:

$$C_F = T_F * C_{mH}$$

**Ecuación 33:** Costo de fabricación [24]

Donde:

$T_F$ : tiempo de fabricación [h]

$C_{mH}$ : costo hora hombre – máquina [\$/h]

A continuación, se muestran valores referenciales para ciertos procesos en la Tabla 5:

**Tabla 5:** Costos hora hombre según la máquina [25]

Máquina	Costo [\$/h]
Torno	15
Fresadora	20
Taladro de mesa	10
Soldadura SMAW	10
Corte plasma	10
Dobladora 3 mm	5
Dobladora 6 mm	10

- Costos de diseño ( $C_D$ )

El precio de un proyecto o de diseño se determina teniendo presente el total de los gastos y la utilidad proyectada. Por lo general, se considera una utilidad (U) entre 15-30% del costo total para producir el proyecto [24]. El costo de diseño se calcula mediante la ecuación 34:

$$C_D = U * (C_{EN} + C_{MP} + C_F)$$

**Ecuación 34:** Costos de diseño [24]

Donde:

U: utilidad, 15 – 30%

- Costos de montaje ( $C_M$ )

Es el porcentaje de costo dedicado al montaje o al ensamble de las piezas fabricadas y normalizadas. Por lo general, el montaje (M) representa un 10-15% del costo total de producción de la máquina [24]. El costo de montaje se calcula mediante la ecuación 35:

$$C_M = M * (C_{EN} + C_{MP} + C_F)$$

**Ecuación 35:** Costos de montaje [24]

*Donde:*

*M: montaje, 10 – 15%*

- Costos indirectos ( $C_{ID}$ )

Es el porcentaje de costo asociado a la adquisición de insumos especiales que se requieran en la fabricación; por ejemplo: herramientas de corte, electrodos, entre otros. También, asocian costos relacionados al transporte de la máquina construida o de la materia prima. Por lo general, los indirectos (I) representa un 5-10% del costo total de producción de la máquina [24]. El costo de montaje se calcula mediante la ecuación 36:

$$C_I = I * (C_{EN} + C_{MP} + C_F)$$

**Ecuación 36:** Costos indirectos [24]

*Donde:*

*I: indirectos, 5 – 10%*

- Costos de imprevistos ( $C_{IM}$ )

Es el porcentaje asociado a los riesgos que se enfrenta durante la ejecución del proyecto. Por ejemplo, el daño de algún elemento durante la fabricación y montaje, reemplazo de elementos que fallen durante las pruebas, entre otros [24].

Este tipo de costo depende del grado de experiencia que tenga el personal con el que se trabaje. Por lo general, los imprevistos ( $I_M$ ) representa un 10-20% del costo total de producción de la máquina [24]. El costo de imprevistos se calcula mediante la ecuación 37:

$$C_{IM} = I_M * (C_{EN} + C_{MP} + C_F)$$

**Ecuación 37:** Costos indirectos [24]

*Donde:*

*I<sub>M</sub>: imprevistos, 10 – 20%*

### 3. DIMENSIONAMIENTO, PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presenta el dimensionamiento de la potencia eléctrica requerida en el proceso de calentamiento y vaporización y, los espesores del aislamiento que se necesitan. Se realizarán pruebas en el vaporizador eléctrico tanto de funcionalidad como de condiciones normales de funcionamiento siguiendo el respectivo protocolo. Los resultados corresponden a un balance de energía del vaporizador y los datos obtenidos permitirán realizar el análisis del mismo, así como determinar la influencia de la potencia eléctrica en el tiempo de calentamiento y de los espesores del aislamiento en las pérdidas de calor. Luego, se presentarán las conclusiones y recomendaciones del diseño térmico de un vaporizador eléctrico en estado estable y transitorio.

#### 3.1. Dimensionamiento

En esta sección se desarrolla el modelo matemático en estado estable y transitorio del vaporizador eléctrico. Esto permitirá obtener resultados de la potencia requerida en la etapa de calentamiento, la potencia necesaria en la etapa de funcionamiento, los espesores del aislamiento utilizado en el conducto de transporte de vapor y la temperatura superficial de funcionamiento seguro del equipo. Se procede a realizar un ejemplo de cálculo aplicado al vaporizador eléctrico.

##### 3.1.1. Requerimientos y restricciones para el vaporizador eléctrico

Las temperaturas a considerarse son las siguientes: temperatura superficial interior ( $T_{si}$ ), temperatura superficial exterior ( $T_{so}$ ) y la temperatura ambiente promedio en la ciudad de Quito ( $T_{\infty}$ ). Esta distribución de temperaturas se muestra en la Figura 11 y se considera de manera conservadora una temperatura superficial interior de 91 [°C] igual a la temperatura de saturación del agua en la ciudad de Quito y; una temperatura superficial exterior de 40 [°C] de manera que no produzca quemaduras al estar en contacto con la piel. En la Tabla 6 se muestran estas restricciones de temperatura.

**Tabla 6:** Restricciones de temperaturas en el vaporizador [Fuente: propia]

Datos					
$T_{si}$		$T_{so}$		$T_{\infty}$	
[°C]	[K]	[°C]	[K]	[°C]	[K]
91	364	40	313	15	288

### 3.1.2. Cálculo del coeficiente de convección natural para el recipiente

- **Determinación de las propiedades termo-físicas del aire**

Para realizar los cálculos necesarios, se debe obtener las propiedades termo-físicas del aire a la temperatura de película calculada con la ecuación 16:

$$T_f = \frac{T_{si} + T_{\infty}}{2}$$

$$T_f = \frac{364 + 288}{2}$$

$$T_f = 326[K]$$

Con la temperatura de película calculada se obtienen las propiedades termo-físicas del aire mediante el software Engineering Equations Solver (EES), el cual proporciona funciones y ecuaciones útiles para la solución de problemas de termodinámica y transferencia de calor [26]. Las propiedades termo-físicas del aire se encuentran en el Anexo I y se las muestra en la Tabla 7:

**Tabla 7:** Propiedades termo-físicas del aire

Propiedad	Valor	Unidad
$\rho$	0.7693	$[kg/m^3]$
$k$	0.02828	$[W/mK]$
$\nu$	$2.569 * 10^{-5}$	$[m^2/s]$
$\alpha$	$3.649 * 10^{-5}$	$[m^2/s]$
$Pr$	0.7041	–
$\beta$	0.003067	$[1/K]$

- **Cálculo del número de Rayleigh y número de Nusselt**

Se utiliza la ecuación 15 para encontrar el número de Rayleigh considerando un diámetro del recipiente de 0.15[m]:

$$Ra_D = \frac{g * \beta * (T_s - T_{\infty}) * D^3}{\nu * \alpha}$$

$$Ra_D = \frac{9.81 * 0.003067 * (364 - 288) * 0.15^3}{2.569 * 10^{-5} * 3.649 * 10^{-5}}$$

$$Ra_D = 8232508.45$$

Como  $Ra_D \leq 10^{12}$  se trata de un flujo laminar y, por lo tanto, se utiliza la ecuación 13:

$$Nu_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 * Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 * 8232508.45^{1/6}}{[1 + (0.559/0.7041)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu_D = 26.649$$

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección natural en estado transitorio, se emplea la ecuación 12 considerando un diámetro del recipiente de 0.15 [m].

$$h_{conv} = \frac{Nu_D * k}{D}$$

$$h_{conv} = \frac{26.649 * 0.02828}{0.15}$$

$$h_{conv} = 5.02 [W/m^2K]$$

### 3.1.3. Cálculo del coeficiente de radiación en la superficie del recipiente de agua

Se determina el coeficiente de transferencia de calor por radiación mediante la ecuación 17 considerando una emisividad del plástico de 0.95 [27].

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_\infty) * (T_s^2 + T_\infty^2)$$

$$h_{rad} = 0.95 * 5.67 * 10^{-8} * (364 + 288) * (364^2 + 288^2)$$

$$h_{rad} = 7.57 [W/m^2K]$$

### 3.1.4. Cálculo del coeficiente de convección-radiación en estado transitorio

Se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección-radiación en estado transitorio mediante la ecuación 10:

$$h_{cr} = h_{conv} + h_{rad}$$

$$h_{cr} = 5.02 + 7.57$$

$$h_{cr} = 12.6 [W/m^2K]$$

### 3.1.5. Dimensiones del recipiente y propiedades termo-físicas del agua

Se requiere 1000 [ml] de volumen de agua para vaporizar en un tiempo máximo de 15 [min] como se muestra en la Tabla 1 y un exceso de 700 [ml] de agua para que la resistencia eléctrica no quede descubierta y por ende no se quemé. De acuerdo a este volumen total se considera un diámetro del recipiente de 15 [cm] y una altura del mismo de 10 [cm].

Como el área de convección y radiación son las mismas para el recipiente, se define una nueva variable denominada  $A_{cr}$  y se calcula con la ecuación 38:

$$A_{conv} = A_{rad} = A_{cr} = 2 * \pi * r_r * h_r + \pi * r_r^2$$

**Ecuación 38:** Área de convección-radiación del recipiente del vaporizador

Donde:

$A_{cr}$ : área de convección – radiación del recipiente [ $m^2$ ]

$r_r$ : radio del recipiente [m]

$h_r$ : altura del recipiente [m]

Utilizando la ecuación 38 se tiene:

$$A_{cr} = 2 * \pi * \left(\frac{0.15}{2}\right) * (0.10) + \pi * \left(\frac{0.15}{2}\right)^2$$
$$A_{cr} = 0.06 [m^2]$$

Por otro lado, en la Tabla 8 se muestran las propiedades termo-físicas del agua obtenidas mediante el software EES que se muestra en el Anexo II.

**Tabla 8:** Propiedades termo-físicas del agua para el proceso de calentamiento

Propiedad	Valor	Unidad
$\rho_w$	986.6	[ $kg/m^3$ ]
$Cp_w$	4182	[ $J/kgK$ ]
$V_w$	0.001	[ $m^3$ ]
$T_{in}$	15	[ $^{\circ}C$ ]

### 3.1.6. Modelo matemático del vaporizador en estado transitorio

La solución de la ecuación 11 se obtiene mediante el software Matlab y se muestra en la ecuación 39:

$$T_w = \frac{P_{el} - P_{el} * e\left(-\frac{A_{cr} * h_{cr} * t}{c p_w * V_w * \rho_w}\right) + A_{cr} * T_{in} * h_{cr}}{A_{cr} * h_{cr}}$$

**Ecuación 39:** Temperatura del agua en función del tiempo

Donde:

$T_w$ : temperatura del agua [°C]

$t$ : tiempo [s]

$P_{el}$ : potencia eléctrica de la resistencia [W]

$A_{cr}$ : área de convección – radiación [m<sup>2</sup>]

$T_{in}$ : temperatura inicial del agua, temperatura promedio del ambiente [°C]

$h_{cr}$ : coeficiente de convección – radiación [W/m<sup>2</sup>K]

$c p_w$ : calor específico del agua [J/kg \* K]

$V_w$ : volumen del agua [m<sup>3</sup>]

$\rho_w$ : densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]

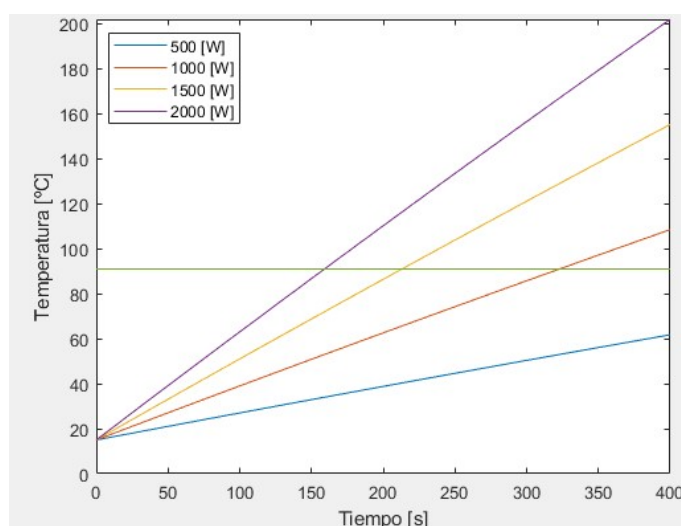
Se desarrolla la ecuación 39 en el software Matlab como se muestra en el Anexo III para observar el comportamiento del sistema en estado transitorio. A continuación, se muestra la Tabla 9 donde se compilan datos de tiempo en función de la temperatura del agua y la potencia eléctrica:

**Tabla 9:** Tiempos de calentamiento según la temperatura del agua y potencia eléctrica

Pel= 500[W]		Pel= 1000[W]		Pel= 1500[W]		Pel= 2000[W]	
Tiempo [s]	Tw[°C]	Tiempo [s]	Tw[°C]	Tiempo [s]	Tw[°C]	Tiempo [s]	Tw[°C]
0	15,00	0	15,00	0	15,00	0	15,00
20	17,42	10	17,42	7	17,54	5	17,42
40	19,83	20	19,84	14	20,08	10	19,84
60	22,23	30	22,25	21	22,62	15	22,26
80	24,62	40	24,66	28	25,15	20	24,68
100	27,01	50	27,06	35	27,68	25	27,09
120	29,38	60	29,46	42	30,21	30	29,50
140	31,75	70	31,86	49	32,73	35	31,91
160	34,11	80	34,25	56	35,25	40	34,32
180	36,46	90	36,63	63	37,77	45	36,72
200	38,80	100	39,02	70	40,29	50	39,13
220	41,13	110	41,39	77	42,80	55	41,53
240	43,45	120	43,77	84	45,30	60	43,92
260	45,77	130	46,14	91	47,81	65	46,32
280	48,08	140	48,50	98	50,31	70	48,71
300	50,37	150	50,86	105	52,81	75	51,11
320	52,66	160	53,22	112	55,30	80	53,50

340	54,95	170	55,57	119	57,79	85	55,88
360	57,22	180	57,91	126	60,28	90	58,27
380	59,48	190	60,26	133	62,77	95	60,65
400	61,74	200	62,60	140	65,25	100	63,03
420	63,99	210	64,93	147	67,73	105	65,41
440	66,23	220	67,26	154	70,20	110	67,79
460	68,46	230	69,59	161	72,68	115	70,16
480	70,68	240	71,91	168	75,15	120	72,53
500	72,90	250	74,23	175	77,61	125	74,90
520	75,11	260	76,54	182	80,08	130	77,27
540	77,31	270	78,85	189	82,54	135	79,64
560	79,50	280	81,15	196	84,99	140	82,00
580	81,68	290	83,45	203	87,45	145	84,36
600	83,86	300	85,75	205	88,15	150	86,72
620	86,02	310	88,04	207	88,85	155	89,08
640	88,18	320	90,33	209	89,55	156	89,55
660	90,33	321	90,56	211	90,25	157	90,02
665	90,87	322	90,78	212	90,60	158	90,49
666	90,98	323	91,01	213	90,94	159	90,96
667	91,09	324	91,24	214	91,29	160	91,43
668	91,19	325	91,47	215	91,64	161	91,90

Los datos que se obtienen de la simulación que se enlistan en la Tabla 9 se los muestran gráficamente en la Figura 14:



**Figura 14:** Temperatura en función del tiempo y la potencia eléctrica en estado transitorio  
[Fuente: propia]



Del análisis de la Figura 14 y la Tabla 9 se dice que para alcanzar la temperatura que corresponde a la temperatura de saturación del agua en la ciudad de Quito se obtienen los resultados que se muestran en se obtiene la Tabla 10.

**Tabla 10:** Tiempos de calentamiento del agua en la ciudad de Quito variando la potencia eléctrica

Potencia [W]	Tiempo de calentamiento [s]
500	666
1000	323
1500	213
2000	159

Como requerimiento de diseño se desea alcanzar la temperatura de saturación del agua en un tiempo no mayor a 5 [min], esto se lo puede lograr con una potencia eléctrica de 1500 [W] o de 2000 [W] según la Tabla 10. Con el propósito de que la resistencia no sea tan grande y puede ser ubicada en el recipiente, se selecciona una resistencia de 1500 [W] que alcanza la temperatura de saturación del agua en 213 [s] y hace que el equipo sea más económico.

### 3.1.7. Cálculo de la energía necesaria para el funcionamiento del equipo en estado estable

Una vez que se alcanza la temperatura de saturación del agua es necesario conocer la cantidad de energía necesaria para el funcionamiento en estado estable del vaporizador la misma que será la suma de las pérdidas de calor desde el recipiente, más el calor latente de vaporización y más las pérdidas de calor por el conducto de transporte de vapor.

#### 3.1.7.1. Cálculo de las pérdidas de calor desde el recipiente de agua

Se determina la energía que sale por el recipiente de agua mediante la ecuación 18:

$$q_r = h_{cr} * A_{cr} * (T_w - T_{\infty})$$

$$q_r = 12.6 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] * 0.06 [m^2] * (91 - 15) [^{\circ}C]$$

$$q_r = 62.56 [W]$$

#### 3.1.7.2. Cálculo del calor latente de vaporización

Se determina el calor latente de vaporización requerido mediante la ecuación 20:

$$q_L = \dot{m}_v * (h_L - h_f)$$

Reemplazando la ecuación 21 en la ecuación anterior se tiene:

$$q_L = \rho_{vapor} * \frac{V_w}{t} * (h_L - h_f)$$

- **Requerimientos y propiedades termo-físicas del vapor de agua**

De la Tabla 1 se conoce que el tiempo máximo de funcionamiento es de 15 [min] considerando un volumen de agua de 1000 [ml] y una calidad de vapor del 60% [28]. A continuación, se muestra la Tabla 11 con las propiedades termo-físicas del vapor de agua obtenidas mediante el software EES que se muestran en el Anexo IV.

**Tabla 11:** Propiedades termo-físicas del vapor de agua para el proceso de funcionamiento

Propiedad	Valor	Unidad
$x_L$	0.6	–
$\rho_L$	0.7232	[kg/m <sup>3</sup> ]
$h_L$	1748	[kJ/kg]
$h_f$	379.9	[kJ/kg]
$V_w$	0.001	[m <sup>3</sup> ]

Utilizando los datos de la Tabla 11, se tiene:

$$q_L = 0.7232 * \frac{0.001}{900} * (1748 - 379.9)$$

$$q_L = 1.1 [W]$$

### **3.1.7.3. Cálculo de la temperatura superficial externa del conducto de transporte de vapor**

Considerando una temperatura uniforme en el conducto de vapor, se desea conocer la temperatura de la superficie exterior ( $T_{so}$ ) que va a depender del espesor del aislamiento. De acuerdo a las condiciones de diseño, se tiene dos secciones en el conducto de transporte de vapor; en la sección 1 se recubrirá con poliuretano inyectado debido a que existe una cavidad para que se produzca la expansión del aislante y en la sección 2 se aplicará poliuretano proyectado ya que se tiene una superficie abierta [29]. A continuación, se muestra la Tabla 12 donde se indica la conductividad térmica de este aislamiento según la forma de aplicación y su emisividad que tiene un valor de 0.87 [30].

**Tabla 12:** Conductividad térmica del poliuretano según la forma de aplicación [31] y su emisividad [30]

Material	Conductividad térmica [W/m*K]	Emisividad
Poliuretano proyectado	0.028	0.87
Poliuretano inyectado	0.036	

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo de  $T_{so}$  para la primera iteración de la sección 1 del vaporizador, el cálculo completo se lo muestra en el Anexo V con ayuda del software EES y Excel.

➤ **Sección 1**

• **Resistencia de conducción**

Para el cálculo de la resistencia de conducción se considera un espesor de 1 [cm] y los siguientes parámetros, Tabla 13:

**Tabla 13:** Parámetros considerados para el cálculo de la resistencia de conducción

Parámetros	Valor	Unidad
$r_2$	0.0227	[m]
$r_1$	0.0127	[m]
$k_{poliuretano}$	0.036	[W/mK]
$L_{vert}$	0.15	[m]

Se determina la resistencia de conducción mediante la ecuación 27:

$$R_{k1} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * k * L_{vert}}$$

$$R_{k1} = \frac{\ln(0.0227/0.0127)}{2 * \pi * 0.036 * 0.15}$$

$$R_{k1} = 17.12 [K/W]$$

• **Resistencia de radiación**

Para el cálculo de la resistencia de radiación se debe determinar el área de radiación y el coeficiente de radiación. Para el cálculo del área de radiación se debe considerar el radio mayor y la longitud:

$$A_r = 2 * \pi * r_2 * L_{vert}$$

$$A_r = 2 * \pi * 0.0227 * 0.15$$

$$A_r = 0.02[m^2]$$

Para el cálculo del coeficiente de radiación se consideran los siguientes parámetros de la Tabla 14:

**Tabla 14:** Parámetros considerados para el cálculo del coeficiente de radiación

Parámetros	Valor	Unidad
$\varepsilon_{pol}$	0.87	–
$\sigma$	$5.67 * 10^{-8}$	$[W/m^2K^4]$
$T_{so}$	313	$[K]$
$T_{\infty}$	288	$[K]$

El coeficiente de radiación se determina con la ecuación 17:

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_{so} + T_{\infty}) * (T_{so}^2 + T_{\infty}^2)$$

$$h_{rad} = 0.87 * 5.67 * 10^{-8} * (313 + 288) * (313^2 + 288^2)$$

$$h_{rad} = 5.36 [W/m^2K]$$

Se determina la resistencia de radiación mediante la ecuación 30:

$$R_r = \frac{1}{h_{rad} * A_r}$$

$$R_r = \frac{1}{5.36 * 0.02}$$

$$R_r = 8.71 [K/W]$$

- **Resistencia de convección**

Para el cálculo de la resistencia de convección se debe determinar el área de convección y el coeficiente de convección. Para el cálculo del área de convección se debe considerar el radio y la longitud:

$$A_c = 2 * \pi * r_2 * L_{vert}$$

$$A_c = 2 * \pi * 0.0227 * 0.15$$

$$A_c = 0.02[m^2]$$

La temperatura de película es el promedio de la temperatura superficial externa y la temperatura ambiente promedio.

$$T_f = \frac{T_{so} + T_{\infty}}{2}$$

$$T_f = \frac{313 + 288}{2}$$

$$T_f = 300.5 [K]$$

El número de Rayleigh se calcula con los datos que se muestran en la Tabla 15 mediante la ecuación 15.

**Tabla 15:** Parámetros considerados para el cálculo del número de Rayleigh

Parámetros	Valor	Unidad
$g$	9.81	$[m/s^2]$
$\beta$	0.003	$[1/K]$
$L_{vert}$	0.15	$[m]$
$T_{so}$	313	$[K]$
$T_{\infty}$	288	$[K]$
$\nu$	$2.22 * 10^{-5}$	$[m^2/s]$
$\alpha$	$3.145 * 10^{-5}$	$[m^2/s]$

$$Ra_L = \frac{g * \beta * (T_{so} - T_{\infty}) * L_{vert}^3}{\nu * \alpha}$$

$$Ra_L = \frac{9.81 * 0.003 * (313 - 288) * 0.15^3}{2.22 * 10^{-5} * 3.145 * 10^{-5}}$$

$$Ra_L = 3945160.65$$

Como  $Ra_L < 10^9$  se considera los parámetros  $C = 0.59$  y  $n = 0.25$  [13].

El coeficiente de convección se determina con la ecuación 12 y con los parámetros que se enlistan en la Tabla 16:

**Tabla 16:** Parámetros considerados para el cálculo del coeficiente de convección

Parámetros	Valor	Unidad
$C$	0.59	—
$n$	0.25	—
$Ra_L$	3945160.65	—
$k$	0.0264	$[W/mK]$
$L_{vert}$	0.15	$[m]$

$$h_{conv} = \frac{C * Ra_L^n * k}{L_{vert}}$$

$$h_{conv} = \frac{0.59 * 3945160.65^{0.25} * 0.0264}{0.15}$$

$$h_{conv} = 4.63 [W/m^2 K]$$

La resistencia de convección es; ecuación 29:

$$R_c = \frac{1}{h_{conv} * A_c}$$

$$R_c = \frac{1}{4.63 * 0.02}$$

$$R_c = 10.1 [K/W]$$

- **Resistencia de convección-radiación**

La resistencia de convección-radiación es; ecuación 31:

$$R_{cr} = \frac{1}{h_{conv} * A_{conv}} + \frac{1}{h_{rad} * A_{rad}}$$

$$R_{cr} = 10.1 + 8.71$$

$$R_{cr} = 18.81 [K/W]$$

- **Balance en la pared del vaporizador**

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 25 se calcula la temperatura superficial externa de la pared del vaporizador:

$$T_{so} = \frac{R_{cr} * T_{si} + R_{k1} * T_{\infty}}{R_{cr} + R_{k1}}$$

$$T_{so} = \frac{18.81 * 364 + 17.12 * 288}{18.81 + 17.12}$$

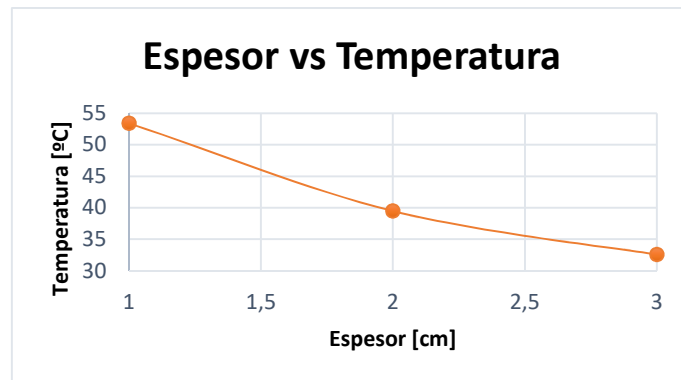
$$T_{so} = 327.8[K] = 54.64 [^{\circ}C]$$

Se realiza una nueva iteración con  $T_{so} = 54.64 [^{\circ}C]$  hasta llegar a la temperatura deseada. Luego, se sigue el mismo procedimiento con diferentes espesores y se obtiene la Tabla 17:

**Tabla 17:** Temperatura de la sección 1 del vaporizador en función del espesor

Espesor del aislamiento [cm]	$Temp_{ext} [K]$	$Temp_{ext} [^{\circ}C]$
1	326.59	53.4
2	312.66	39.5
3	305.73	32.6

Se enlistan los datos de la Tabla 17 y se lo muestra gráficamente en la Figura 15:



**Figura 15:** Temperatura de la sección 1 en función del espesor del aislamiento  
[Fuente: propia]

Debido a que con un espesor de 2 [cm] de poliuretano inyectado se alcanza la temperatura deseada, se escoge dicho espesor para el diseño.

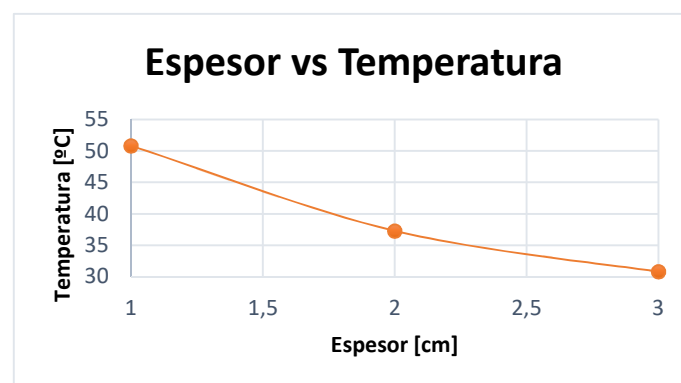
➤ *Sección 2*

Se realiza el mismo proceso iterativo de la sección 1 y se obtiene la Tabla 18:

**Tabla 18:** Temperatura de la sección 2 del vaporizador en función del espesor

Espesor del aislamiento [cm]	$Temp_{ext}$ [K]	$Temp_{ext}$ [°C]
1	323.95	50.8
2	310.46	37.3
3	303.98	30.8

Se enlistan los datos de la Tabla 18 y se lo muestra gráficamente en la Figura 16:



**Figura 16:** Temperatura de la sección 2 en función del espesor del aislamiento  
[Fuente: propia]

Debido a que con un espesor de 2 [cm] de poliuretano proyectado se alcanza la temperatura deseada, se escoge dicho espesor para el diseño.

#### **3.1.7.4. Cálculo de las pérdidas de calor por el conducto de transporte de vapor**

Se determina la energía que sale por la sección 1 y 2 del conducto de transporte de vapor mediante la ecuación 19:

$$\begin{aligned}q_{vert} &= h_{crv} * A_v * (T_{so} - T_{\infty}) \\q_{vert} &= 9.78 * 0.03 * (39.5 - 15) \\q_{vert} &= 7.43 [W]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}q_{ho} &= h_{crh} * A_h * (T_{so} - T_{\infty}) \\q_{hor} &= 8.94 * 0.06 * (37.3 - 15) \\q_{hor} &= 12.38 [W]\end{aligned}$$

$$q_c = q_{vert} + q_{hor}$$

$$q_c = 7.43 + 12.38$$

$$q_c = 19.81 [W]$$

#### **3.1.7.5. Cálculo de la potencia requerida en la etapa de funcionamiento**

Se determina la potencia requerida en la etapa de funcionamiento mediante la ecuación 22:

$$P_{el} = q_r + q_c + q_L$$

$$P_{el} = 62.56 + 19.81 + 1.1$$

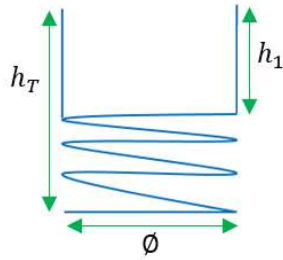
$$P_{el2} = 83.47 [W]$$

Por tanto, se establece una potencia requerida en la etapa de funcionamiento de 100 [W] por limitaciones en el mercado.

#### **3.1.8. Dimensionamiento de la resistencia eléctrica**

La resistencia eléctrica va a ser construida localmente de acero inoxidable con un diámetro no mayor a 15 [cm] y con una altura no mayor a 10 [cm] por las dimensiones del recipiente del agua. De acuerdo a especificaciones de fabricante se conoce la relación entre la potencia y el perímetro; para este caso por cada centímetro de resistencia se tienen 20 [W] de potencia. Se muestra un esquema de la resistencia en la Figura 17:





**Figura 17:** Esquema de la resistencia de inmersión tipo semi-esprial [Fuente: propia]

Se calcula la longitud de la resistencia:

$$P_{vuelta} = D * \pi$$

$$P_{vuelta} = 7\pi \text{ [cm]}$$

$$P_{3vueltas} = 21\pi \text{ [cm]}$$

$$P_{Total} = P_{3vueltas} + altura$$

$$P_{Total} = 21\pi \text{ [cm]} + 10 \text{ [cm]}$$

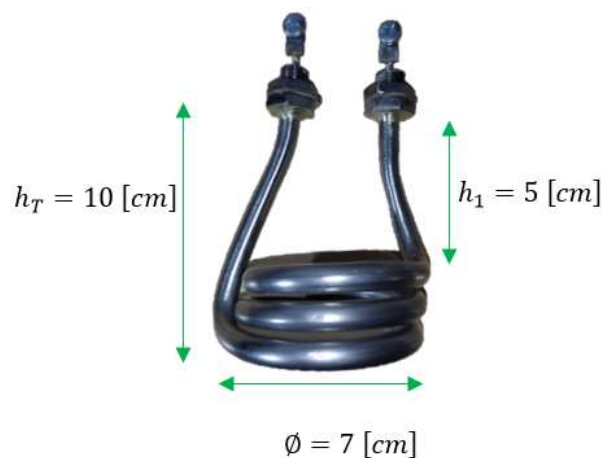
$$P_{Total} = 75 \text{ [cm]}$$

Se calcula la potencia con la relación de perímetro y potencia:

[W]	[cm]
20	1
x	75

Por tanto, la potencia máxima que tendrá la resistencia eléctrica será de 1500 [W].

Considerando las restricciones establecidas en el diseño del recipiente como una altura máxima de 10 [cm] y un diámetro máximo de 15 [cm], se tiene una resistencia tipo semi-esprial que tiene 3 vueltas con un diámetro de 7 [cm] y una altura total de 10 [cm] tal como se muestra en la Figura 18:



**Figura 18:** Dimensiones de la resistencia eléctrica tipo semi esprial [Fuente: propia]

## **3.2. Pruebas**

Una vez construido el vaporizador eléctrico, se procede a realizar las pruebas del mismo considerándose dos condiciones; de funcionalidad y en condiciones normales de funcionamiento del equipo. Las primeras ayudan a mostrar la funcionalidad del vaporizador y las pruebas en condiciones normales de funcionamiento ayudan a corroborar los datos obtenidos de tiempos de calentamiento, presión, temperaturas, volumen de agua consumido humedad y flujo volumétrico del vapor.

### **3.2.1. Pruebas de funcionalidad**

El objetivo de estas pruebas es mostrar la funcionalidad del equipo considerando la casa de la calidad, la cual considera los requerimientos del cliente traducidos a la voz del usuario. Los requerimientos del cliente son:

- Movimiento vertical del vaporizador
- Giro libremente de 360 ° del tubo de distribución
- Fácil de transportar
- Conexión a tomacorriente de 120 [V]
- Fugas en el empaque
- Luces funcionen correctamente

### **3.2.2. Pruebas en condiciones normales de funcionamiento**

El objetivo de estas pruebas es corroborar los datos obtenidos teóricamente del diseño térmico y los valores de las condiciones de operación para luego hacer una comparación de los mismos y, validar el modelo matemático desarrollado en el presente trabajo para el comportamiento térmico del vaporizador eléctrico.

Los datos a obtenerse durante las pruebas son: temperatura y presión ambiental, tiempos y temperaturas de calentamiento, la altura de agua consumida, humedad y velocidad de salida del vapor.

### **3.2.3. Protocolo de pruebas de funcionalidad**

A continuación, se indica como verificar que los requerimientos del cliente se cumplan en el equipo:

- Movimiento vertical del vaporizador: al aflojar el tornillo de presión se verifica que el tubo móvil se desliza libremente y que se posiciona correctamente al ajustarlo.
- Giro libremente de 360 ° del tubo de distribución: se verifica que el tubo de distribución rota libremente.
- Fácil de transportar: se mueve el vaporizador de manera arbitraria y se observa que no exista ningún inconveniente.
- Conexión a tomacorriente de 120 [V]: se mide el voltaje en el equipo para comprobar que sea de 120 [V]; si es así, se procede a conectar el cable al tomacorriente que en Ecuador es de 120 [V].
- Fugas en el empaque: verificar que al encender el equipo no existan fugas de agua y/o vapor.
- Botones funcionen correctamente: al prender el equipo se debe encender el botón rojo e iniciar el calentamiento para verificar que la luz verde se haya encendido cuando haya que seleccionar el tiempo según el tipo de piel.

En la Tabla 19 se presenta el formato para registrar los resultados de las pruebas de funcionalidad.

**Tabla 19:** Formato P1: Resultados de pruebas de funcionalidad

<b>Registro de evaluación</b>		
Fecha y hora de evaluación:		
Nombre del encargado:		
Puesto del encargado:		
<b>Requerimiento</b>	<b>Cumple</b>	
	<b>Si</b>	<b>No</b>
Movimiento vertical del tubo móvil		
Giro libremente de 360° del tubo de distribución		
Fácil de transportar		
Conexión a tomacorriente de 120 [V]		
Fugas en el empaque		
Luces funcionen		

### **3.2.4. Protocolo de pruebas en condiciones normales de funcionamiento**

En este protocolo de pruebas se van a realizar mediciones de los parámetros mencionados en la sección 3.2.2., se mostrará los pasos a seguir para obtener las mediciones de cada parámetro y, luego se mostrarán los instrumentos de medición y el formato que se debe utilizar para registrar los resultados de estas pruebas. En este protocolo se realizarán 3 pruebas de funcionamiento en condiciones normales de funcionamiento y luego se compararán con los datos teóricos del diseño térmico.

Los procedimientos para obtener las mediciones de cada parámetro considerado son:

✓ Temperatura ambiental

Para medir la temperatura ambiental se va a utilizar un termo higrómetro cuyas características se muestran en la Tabla 20.

1. Colocar la batería de 9 [V] al termo higrómetro.
2. Encender el equipo.
3. Verificar en la pantalla el dato de la temperatura ambiental.
4. Registrar la medida de la temperatura ambiental.
5. Realizar la medida al inicio de cada prueba.

✓ Temperaturas de calentamiento

Para medir las temperaturas de calentamiento se va a utilizar una termocupla tipo K cuyas características se muestran en la Tabla 20.

1. Encender el cronómetro y activarlo una vez iniciado el calentamiento.
2. Registrar las mediciones de temperatura que se muestran en el display del vaporizador cada 30 [s] durante 5 [min].
3. Registrar y promediar las mediciones de temperatura a cada instante de pruebas.

✓ Altura de agua consumida

Para medir la altura de agua consumida se va a utilizar una regla de escritorio cuyas características se muestran en la Tabla 20.

1. Llenar el recipiente de agua.

2. Tomar la medida de altura de agua del recipiente.
  3. Encender el equipo e iniciar el tratamiento térmico.
  4. Acabado el tratamiento térmico, tomar la medida de altura de agua del recipiente nuevamente.
  5. Realizar las medidas en cada prueba realizada.
- ✓ Velocidad, temperatura y humedad del vapor

Para medir la velocidad, temperatura y humedad del vapor se va a utilizar un anemómetro cuyas características se muestran en la Tabla 20.

1. Colocar la batería de 9 [V] al anemómetro.
2. Verificar las condiciones normales de funcionamiento.
3. Encender el anemómetro.
4. Esperar el tiempo de calentamiento.
5. Colocar el equipo a la salida del vapor.
6. Presionar la tecla "MPS" del anemómetro para obtener la velocidad en metros por segundo.
7. Registrar la medida de la velocidad de salida del vapor.
8. Presionar la tecla "°C" del anemómetro para obtener la temperatura en grados centígrados.
9. Registrar la medida de la temperatura del vapor.
10. Presionar la tecla "%RH" del anemómetro para obtener la humedad relativa.
11. Registrar las medidas de velocidad, temperatura y humedad del vapor.
12. Realizar las mediciones en cada prueba una vez.

En la Tabla 20 se muestran las características de los instrumentos de medición según su aplicación.

**Tabla 20:** Características de los instrumentos de medición según su aplicación

Parámetro considerados	Instrumento de medición	Características	Equipo
Temperatura ambiental	Termo higrómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registra temperaturas en el rango de [-30 a 100 °C].</li> <li>• Registra humedad relativa de [0-100%].</li> </ul>	
Temperaturas de calentamiento	Termocupla bayoneta tipo K	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de trabajo máximo: 450 [°C].</li> <li>• Diámetro interno: 12.40 [mm].</li> <li>• Alambre de extensión: 2 [m].</li> </ul>	
Altura de agua consumido	Regla de escritorio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mide 30 [cm] de longitud.</li> <li>• Tiene una precisión de 0.5 [mm].</li> </ul>	
Velocidad, temperatura y humedad del vapor	Anemómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registra velocidades en el rango de [0.2 a 40 m/s].</li> <li>• Registra temperaturas en el rango de [-20 a 80 °C].</li> <li>• Registra humedad relativa de [5-95%].</li> </ul>	

En la Tabla 21 se presenta el formato para registrar los resultados de las pruebas en condiciones normales de funcionamiento.

**Tabla 21:** Formato P2: Resultados de pruebas en condiciones normales de funcionamiento para un parámetro

<b>Registro de evaluación</b>				
Fecha y hora de evaluación:				
Nombre del encargado:				
Puesto del encargado:				
Parámetro de medición:				
Magnitud:				
<b>Tiempo</b> <b>[s]</b>	<b>Medición</b> <b>1</b>	<b>Medición</b> <b>2</b>	<b>Medición</b> <b>3</b>	<b>Promedio</b>

### 3.3. Resultados

Luego de haber construido el vaporizador eléctrico, se presentan los resultados y el análisis de las pruebas de funcionalidad y las de condiciones normales de funcionamiento del equipo para los diferentes parámetros evaluados. También, se realiza el análisis de costos para la construcción del prototipo del vaporizador eléctrico y un respectivo análisis de costos.

#### 3.3.1. Pruebas de funcionalidad

Después de verificar que los requerimientos del cliente se cumplan en el vaporizador eléctrico, siguiendo el protocolo de pruebas de funcionalidad, los resultados se muestran en la Tabla 22.

Al observar la Tabla 22 y ver que los requerimientos del cliente, expuestos en la etapa de diseño del equipo, se cumplen se concluye que, el vaporizador eléctrico funciona correctamente cumpliendo con los criterios mostrados en la casa de la calidad [23].

**Tabla 22:** Resultados de pruebas de funcionalidad

<b>Registro de evaluación</b>		
Fecha y hora de evaluación:	09/08/2022 Hora: 9am	
Nombre del encargado:	Lizbeth Jaramillo	
Puesto del encargado:	Estudiante	
<b>Requerimiento</b>	<b>Cumple</b>	
	<b>Si</b>	<b>No</b>
Movimiento vertical del tubo móvil	✓	
Giro libremente de 360° del tubo de distribución	✓	
Fácil de transportar	✓	
Conexión a tomacorriente de 120 [V]	✓	
Fugas en el empaque		✓
Luces funcionen	✓	

### 3.3.2. Pruebas de condiciones normales de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento del equipo se realizan en el Laboratorio de Energías Alternativas de la Escuela Politécnica Nacional. Se ubican los instrumentos de medición mostrados en la Tabla 20, se procede a encender el equipo para empezar con las pruebas y a registrar los datos cada 30 segundos como se establece en el protocolo mostrado en 3.2.4. Los resultados se muestran en las Tablas 23,24, 25, 26, 27 y 28.

- Temperatura ambiental

Durante las pruebas se midió la temperatura ambiente, cuyos resultados se muestran en la Tabla 23:

**Tabla 23:** Temperatura ambiental

<b>Registro de evaluación</b>			
Fecha y hora de evaluación:		09/08/2022 Hora: 9am	
Nombre del encargado:		Lizbeth Jaramillo	
Puesto del encargado:		Estudiante	
Parámetro de medición:		Temperatura	
Magnitud:		[°C]	
<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>
18.7	18.5	18.1	18.4



De los resultados de Tabla 23 se nota que la temperatura promedio ambiente es 18.4 [°C].

- Temperatura de calentamiento del agua

Durante la realización de las pruebas se midió la temperatura del agua desde el tiempo 0 [seg], cuyos resultados se muestran en la Tabla 24:

**Tabla 24:** Temperatura del agua en condiciones normales de funcionamiento

<b>Registro de evaluación</b>				
Fecha y hora de evaluación:			09/08/2022 Hora: 9am	
Nombre del encargado:			Lizbeth Jaramillo	
Puesto del encargado:			Estudiante	
Parámetro de medición:			Temperatura	
Magnitud:			[°C]	
<b>Tiempo [s]</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>
0	15	15	15	15
30	17	16	17	17
60	25	23	25	24
90	33	35	34	34
120	42	42	40	41
150	46	45	47	46
180	54	56	57	56
210	63	60	62	62
240	69	70	68	69
270	71	73	70	71
300	80	82	81	81
330	87	86	88	87
340	91	90	91	91
360	91	91	91	91
390	91	91	91	91
420	91	91	91	91
450	91	91	91	91
480	91	91	91	91
510	91	91	91	91
540	91	91	91	91
570	91	91	91	91
600	91	91	91	91

Con el funcionamiento del vaporizador a la temperatura y potencia de calentamiento máximas desde la temperatura ambiente, se concluye de la Tabla 24 que el vaporizador

llegó a la temperatura de 91 [°C] en 5 [min] 40 [s] después de haber iniciado el calentamiento.

- Validación del modelo matemático para el calentamiento del agua

Se procede a calcular el modelo matemático planteado en la ecuación 39 con la potencia eléctrica medida en la resistencia, la temperatura ambiente, las propiedades termo-físicas del agua y los cálculos del coeficiente y área de convección-radiación, Tabla 25:

**Tabla 25:** Variables consideradas para el cálculo de la temperatura de calentamiento del agua

Propiedad	Valor	Unidad
$P_{el}$	1512	[W]
$A_{cr}$	0.06	[m <sup>2</sup> ]
$h_{cr}$	12.06	[W/m <sup>2</sup> K]
$T_{in}$	15	[°C]
$\rho_w$	991.1	[kg/m <sup>3</sup> ]
$Cp_w$	4184	[J/kgK]
$V_w$	0.001	[m <sup>3</sup> ]

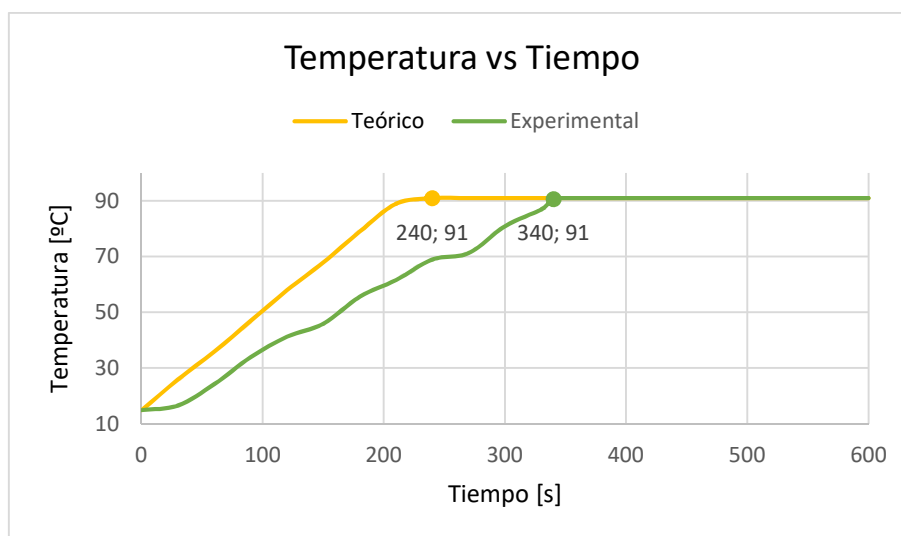
Los resultados de utilizar la ecuación 39, correspondiente a la temperatura de calentamiento del agua, se muestran en la Tabla 26:

**Tabla 26:** Temperaturas de calentamiento experimentales, teóricas y error absoluto

Tiempo [s]	Experimental [°C]	Teórico [°C]	Error Porcentual [%]
0	15	15	0
30	17	26	36
60	24	36	32
90	34	47	28
120	41	58	29
150	46	68	32
180	56	79	30
210	62	89	31
240	69	91	24
270	71	91	22
300	81	91	11
330	87	91	4
340	91	91	0
360	91	91	0
		<b>Promedio</b>	20

De la Tabla 26 se tiene que el promedio del error entre los valores teóricos y experimentales es del 20% y, por tanto, el modelo matemático es aceptable y queda validado [13].

Los datos que se obtienen de la experimentación junto con los datos obtenidos de la simulación que se enlistan en la Tabla 26, se los muestran gráficamente en la Figura 19:



**Figura 19:** Temperatura en función del tiempo [Fuente: propia]

Con la ecuación 39, se calculan los datos de temperatura del agua teóricos con parámetros de funcionamiento reales. Existe una variación entre las temperaturas de calentamiento teóricos y reales; esto se debe a que las propiedades termo-físicas de los fluidos utilizadas en el cálculo no fueron medidas experimentalmente y generó esta diferencia de valores.

- Velocidad del vapor a una distancia de 30 [cm] de la boquilla

Una vez que se ha producido vapor, se procede a hacer las pruebas de la velocidad del vapor a una distancia de 30 [cm] de la boquilla, cuyos resultados se muestran en Tabla 27:

**Tabla 27:** Velocidad del vapor a una distancia de 30 [cm] de la boquilla

<b>Registro de evaluación</b>			
Fecha y hora de evaluación:		09/08/2022 Hora: 9am	
Nombre del encargado:		Lizbeth Jaramillo	
Puesto del encargado:		Estudiante	
Parámetro de medición:		Velocidad	
Magnitud:		[m/s]	
<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Pruebas 3</b>	<b>Promedio</b>
0.27	0.25	0.27	0.26

La velocidad del vapor a una distancia de 30 [cm] de la salida del vapor teórico es 0.2 [m/s] y de la Tabla 27, el valor experimental es 0.26 [m/s]. Se tiene un error porcentual de 30%.

- Humedad del vapor en la boquilla

Una vez que se ha producido vapor, se procede a hacer las pruebas de la humedad del vapor a una distancia de 30 [cm] de la boquilla, cuyos resultados se muestran en Tabla 28:

**Tabla 28:** Humedad del vapor a la salida

<b>Registro de evaluación</b>			
Fecha y hora de evaluación:		09/08/2022 Hora: 9am	
Nombre del encargado:		Lizbeth Jaramillo	
Puesto del encargado:		Estudiante	
Parámetro de medición:		Humedad	
Magnitud:		[%]	
<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>
67	62	69	66

La humedad del vapor a una distancia de 30 [cm] de la salida del vapor teórico es 60% y de la Tabla 28 el valor experimental es 66%. Se tiene un error porcentual de 10%.

- Temperatura del vapor a la salida y a una distancia de 30 [cm]

Una vez que se ha producido vapor, se procede a hacer las pruebas de la temperatura del vapor a la salida y a una distancia de 30 [cm] de la boquilla, cuyos resultados se muestran en Tabla 29:

**Tabla 29:** Temperatura del vapor a la salida y a una distancia de 30 [cm]

<b>Registro de evaluación</b>				
Fecha y hora de evaluación:			09/08/2022 Hora: 9am	
Nombre del encargado:			Lizbeth Jaramillo	
Puesto del encargado:			Estudiante	
Parámetro de medición:			Temperatura	
Magnitud:			[°C]	
<b>Distancia [cm]</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>
0	91	90	90	90
30	26	24	25	25

De la Tabla 29 se concluye que, la temperatura de vapor que estará en contacto con la piel, temperatura de vapor a una distancia de 30 [cm], es óptima ya que no producirá quemaduras en la misma, a diferencia de la temperatura de vapor a la salida que si ocasionará lesiones. Temperatura máxima permitida en la piel para no producir lesiones es de 40 [°C].

- Altura del agua en el recipiente de almacenamiento

Se procede a hacer las pruebas de la altura del agua una vez que ha finalizado el tratamiento facial, los resultados se muestran en la Tabla 30:

**Tabla 30:** Altura de agua en condiciones normales de funcionamiento

<b>Registro de evaluación</b>				
Fecha y hora de evaluación:			09/08/2022 Hora: 9am	
Nombre del encargado:			Lizbeth Jaramillo	
Puesto del encargado:			Estudiante	
Parámetro de medición:			Altura de agua	
Magnitud:			[cm]	
<b>Tiempo</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Promedio</b>
Inicial	8.5	8.5	8.5	8.5
Final	8	8	7.9	8

La altura final del agua teórica es 7.8 [cm] con una altura inicial de 8.5 [cm] y de la Tabla 30 el valor experimental inicial es 8.5 [cm] y el valor experimental final es 8 [cm]. Por tanto, se tiene un error porcentual de la medida final entre el valor experimental y el teórico de 2.56%.

### **3.3.3. Costos para la construcción del vaporizador eléctrico**

En la sección 2.5. del presente proyecto se detallan los tipos de costos considerados para la construcción del vaporizador eléctrico. Se utilizan las ecuaciones 33, 34, 35, 36 y 37 para obtener los costos totales del vaporizador.

Los costos que fueron considerados se muestran en la Tabla 31:

**Tabla 31:** Costos para la construcción del vaporizador eléctrico

Tipo de costo	Detalles	Valor [\$]	Porcentaje [%]
Costos de elementos normalizados ( $C_{EN}$ )	Elementos normalizados de la parte eléctrica	197	
	<i>Total</i>	197	30.1
Costos de materias primas ( $C_{MP}$ )	Resistencia eléctrica	70	
	Tubo de acero ASTM A53	15	
	Chapa de acero	10	
	<i>Total</i>	95	14.5
Costos de fabricación ( $C_F$ )	Parte estructural	115	
	Parte eléctrica	60	
	<i>Total</i>	175	26.8
Costos de diseño ( $C_D$ )	$C_D = U * (C_{EN} + C_{MP} + C_F)$ $U = 15\%$	70	10.7
Costos de montaje ( $C_M$ )	$C_M = M * (C_{EN} + C_{MP} + C_F)$ $M = 10\%$	47	7.1
Costos indirectos ( $C_I$ )	$C_I = I * (C_{EN} + C_{MP} + C_F)$ $I = 5\%$	23	3.6
Costos imprevistos ( $C_{IM}$ )	$C_{IM} = IM * (C_{EN} + C_{MP} + C_F)$ $I_M = 10\%$	47	7.1
	<b>Total</b>	<b>653</b>	<b>100</b>

El costo total del prototipo del vaporizador es de \$653. Se debe tener en cuenta, que al hacer producción en serie disminuiría el costo total ya que se prorratarían los costos de diseño, indirectos e imprevistos y el costo total del equipo en una producción masiva sería de \$513. Sin embargo, para que el equipo sea competitivo respecto a la competencia se debe disminuir aún más el costo.

### 3.4. Conclusiones

- Se cumplió el objetivo general del proyecto debido a que se realizó el diseño térmico del vaporizador eléctrico, se construyó el equipo y se realizó el montaje y pruebas del mismo.
- El modelo matemático que se desarrolló permitió diseñar y predecir el comportamiento térmico del equipo, obteniéndose un error del 20% en los tiempos y temperaturas de calentamiento. Esto se debe a que las fórmulas utilizadas para

determinar el coeficiente de convección tienen una incertidumbre que pueden alcanzar el 10%, las propiedades termo-físicas de los fluidos varían con la temperatura y en el modelo se consideran constantes al igual que las propiedades térmicas de los materiales.

- Durante el tiempo en el cual se genera el vapor para el tratamiento facial de 10 [min], la disminución del volumen del agua fue de 70 [ml], lo cual garantiza que la resistencia de inmersión no se quede descubierta y pueda fundirse.
- El costo total del prototipo del vaporizador es de \$653, donde los costos más representativos son de elementos eléctricos como el controlador de temperatura, el módulo dimmer y el temporizador; a estos y otros más se los denominan como elementos normalizados y representan el 30% del valor total del prototipo. Se concluye que este costo es aceptable ya que está establecido por el mercado. Otro costo representativo es la mano de obra de la parte estructural y eléctrica; a estos se los denomina costos de fabricación y representan el 27% del costo total. Se considera que este costo es elevado ya que al fabricar solo un prototipo va a ser más costoso que producir a gran escala.
- Una vez probado el equipo en la piel de las personas, se concluye que el tratamiento facial es agradable y que el equipo si cumple con la función de generar vapor a un flujo confortable y a temperaturas admisibles para la piel.

### **3.5. Recomendaciones**

- Se recomienda que al inicio de la operación del equipo se verifique el nivel mínimo establecido de agua señalado en el recipiente.
- Debido a que la temperatura a la salida del vapor es de 90 [°C], se debe tener en cuenta la distancia recomendada de 30 [cm] entre la salida del vapor y la piel para que no se produzcan lesiones o quemaduras en la misma.
- Se recomienda utilizar el modelo matemático desarrollado en el presente trabajo para sistemas semejantes que permitan predecir el comportamiento térmico de un recipiente con calentamiento eléctrico de un solo fluido; por ejemplo, para cafeteras, humidificadores, calentamiento de mermeladas o producción de vapor en mayor cantidad.

- Se recomienda fabricar o importar la resistencia de inmersión para reducir los costos del equipo debido a que este costo representa el 11% del costo total del prototipo.
- Se recomienda que el equipo sea utilizado en el Laboratorio de transferencia de calor para realizar prácticas de sistemas de intercambio de calor con almacenamiento de energía

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Aguayo, «¿QUÉ ES UN TRATAMIENTO FACIAL Y CÓMO ME AYUDA?,» 21 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.esteticamartaaguayo.com/que-es-un-tratamiento-facial/>. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [2] Cadena, «Estos son los beneficios que tiene en la piel de tu rostro el vapor de agua,» 12 Junio 2020. [En línea]. Available: [https://www.cadena100.es/el-coach/noticias/beneficios-vapor-agua-piel-rostro-20200612\\_764639](https://www.cadena100.es/el-coach/noticias/beneficios-vapor-agua-piel-rostro-20200612_764639). [Último acceso: 29 Diciembre 2021].
- [3] Weelko, «Manual de instrucciones WE-2013-A30-1,» Septiembre 2019. [En línea]. Available: [https://www.svetkadernictvi.cz/file/553/Manual\\_ES-EN-FR-DE.pdf](https://www.svetkadernictvi.cz/file/553/Manual_ES-EN-FR-DE.pdf). [Último acceso: 29 Diciembre 2021].
- [4] Amazon, «Dakavia Vaporizador facial profesional, ozono, vapor y tiempo controlable, equipo de vaporizador facial de spray caliente, cuidado de la piel de spa belleza,» Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/Vaporizador-profesional-controlable-vaporizador-caliente/dp/B082LPDSXN>. [Último acceso: 24 Enero 2022].
- [5] Ubuy, «Professional Facial Steamer, Loxey Face Steamer with Adjustable Nozzle and Stronger Nano Ionic Hot Mist for Facial Deep Cleaning for Professional Beauty Salon or Home Use.(White),» Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://www.ubuy.ec/es/product/1BS8GFV1U-professional-facial-steamer-loxey-face-steamer-with-adjustable-nozzle-and-stronger-nano-ionic-hot-mist-for-facial-deep-cleaning-for-professional>. [Último acceso: 24 Enero 2022].
- [6] Ubuy, «Vapor facial, niebla caliente, humidificador de ozono, puede usar en el hogar y en el salón de belleza, extrae espinillas, rejuvenece e hidrata la piel de su cara para una tez juvenil,» Mayo 2021. [En línea]. Available: [https://www.ubuy.ec/es/product/30ALSLK-professional-facial-steamer-hot-mist-ozone-humidifier-can-use-at-home-and-beauty-salon-extract-black/?ubuy\\_open\\_source=37273798](https://www.ubuy.ec/es/product/30ALSLK-professional-facial-steamer-hot-mist-ozone-humidifier-can-use-at-home-and-beauty-salon-extract-black/?ubuy_open_source=37273798). [Último acceso: Enero 2022].
- [7] Ubuy, «Vapor facial de ozono, vaporizador facial de salón de spa con función Hot Mist, se puede usar un equipo de belleza en el hogar y en el salón de belleza, eliminar espinillas, hidratante, piel limpia y poros,» Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.ubuy.ec/es/product/3UAHDR0DY-ozone-facial-steamer-professional-spa-salon-facial-steamer-with-hot-mist-function-a-beauty-equipment-can-be-used-at>



- home-and-beauty-salon-remove/?ubuy\_open\_source=37273798. [Último acceso: Enero 2022].
- [8] Aire Acondicionado, «Calor Sensible y Calor Latente,» 01 Octubre 2015. [En línea]. Available: [http://www.aire-acondicionado.com.es/calor\\_sensible-y-calor\\_latente/](http://www.aire-acondicionado.com.es/calor_sensible-y-calor_latente/). [Último acceso: 30 Diciembre 2021].
- [9] Y. A. Cengel y A. J. Ghajar, «Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y Aplicaciones. Cuarta Edición,» McGrawHill, México, 2012.
- [10] Khan Academy, «Capacidad calorífica, calor de vaporización y densidad del agua,» 03 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/chemistry-of-life/structure-of-water-and-hydrogen-bonding/a/specific-heat-heat-of-vaporization-and-freezing-of-water>. [Último acceso: 30 Diciembre 2021].
- [11] UNACH, «Propiedades de las sustancias puras,» 18 Octubre 2017. [En línea]. Available: <http://termodinamica-unach.blogspot.com/p/unidad-iii.html?m=1>. [Último acceso: 03 Junio 2022].
- [12] C. Nergiza, «Radiación, conducción y convección: tres formas de transferencia de calor,» 27 Junio 2013. [En línea]. Available: <https://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/>. [Último acceso: 06 Mayo 2022].
- [13] D. D. Frank Incropera, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Philadelphia: John Wiley & Sons, 2011.
- [14] Lifeder, «Transferencia de calor por conducción,» 14 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/transferencia-calor-conduccion/>. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [15] Y. Cengel, Termodinámica, EEUU: McGraw-Hill, 2015.
- [16] The Trekking Life, «LA PERDIDA DE CALOR CORPORAL,» 07 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://thetrekkinglife.com/articulos/seguridad-y-supervivencia/112-la-perdida-de-calor-corporal>. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [17] G. Briceño, «Efecto Joule,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.euston96.com/efecto-joule/>. [Último acceso: 06 Mayo 2022].
- [18] CEIV, «Resistencia de inmersión,» 2021. [En línea]. Available: <https://ceiv.com.mx/resistencia-de-inmersion/>. [Último acceso: 2021 Julio 19].
- [19] J. M. Naya, «Resistencias para Calentamiento de Líquidos | JulioMartínezNaya.com,» Julio Martínez Naya S.A., s.f. [En línea]. Available: <https://www.juliomartineznaya.com/resistencias-industriales-tipo-de-material-a-calentar/resistencias-calentamiento-de-liquidos/>. [Último acceso: 3 Enero 2022].
- [20] R. Arboleda, Electricidad básica para actividades prácticas, Quito, 2010.
- [21] helloauto, «¿Qué es el Fusible?- Glosario de mecánica | Hello Auto,» Hello Auto, s.f. [En línea]. Available: <https://helloauto.com/glosario/fusible>. [Último acceso: 3 Enero 2022].

- [22] A. Márquez, «Transferencia de calor por convección,» 2017.
- [23] H. Salazar, «Diseño y construcción de un vaporizador eléctrico de uso doméstico,» Quito, 2022.
- [24] T. Veslateguí, «Producción por virutaje,» Quito, 2015.
- [25] N. Martínez, «Diseño y construcción de un motocultor para cultivo de productos de ciclo corto en terrenos pequeños,» Quito, 2019.
- [26] Wikipedia, «Engineering Equation Solver,» 22 Abril 2022. [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Engineering\\_Equation\\_Solver](https://en.wikipedia.org/wiki/Engineering_Equation_Solver). [Último acceso: 13 Junio 2022].
- [27] M. León, «La termografía en la industria del plástico,» 18 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/31411-La-termografia-en-la-industria-del-plastico.html>. [Último acceso: 13 Junio 2022].
- [28] Vivienda Saludable, «¿Cuál es la mejor temperatura ambiente?,» 10 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.viviendasaludable.es/confort-bienestar/climatizacion/cual-es-la-mejor-temperatura-ambiente>. [Último acceso: 17 Junio 2022].
- [29] Asociación de la Industria del Poliuretano Rígido, «Poliuretano inyectado. ¿Cuándo debemos utilizarlo?,» 22 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://aislaconpoliuretano.com/cuando-utilizar-poliuretano-inyectado/#:~:text=Sin%20embargo%2C%20quiz%C3%A1%20algunos%20todav%C3%ADa,la%20misma%20forma%20de%20aplicaci%C3%B3n..> [Último acceso: 18 Junio 2022].
- [30] A. A. Azemati, «Heat insulation effect in solar radiation of polyurethane powder coating nanocomposite,» 19 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-00181-1>. [Último acceso: 20 Junio 2022].
- [31] Eco Green Home, «Aislamiento térmico con poliuretano,» 15 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://ecogreenhome.es/productos/aislamiento-termico-poliuretano/#:~:text=El%20Poliuretano%20es%20un%20material,altos%20valores%20de%20resistencia%20t%C3%A9rmica..> [Último acceso: 18 Junio 2022].

## **5. ANEXOS**

ANEXO I. Propiedades termo-físicas del aire

ANEXO II. Propiedades termo-físicas del agua

ANEXO III. Modelo matemático en estado transitorio

ANEXO IV. Propiedades termo-físicas del vapor de agua

ANEXO V. Iteraciones de temperatura superficial para el conducto de transporte de vapor

ANEXO VI: Evidencias de la realización del tratamiento facial

ANEXO VII: Manual del usuario del vaporizador eléctrico

## ANEXO I

```
T[1]=298,883522[K]  
P[1]=72[kPa]  
rho[1]=Density(Air_ha;T=T[1];P=P[1])  
k[1]=Conductivity(Air_ha;T=T[1];P=P[1])  
nu[1]=KinematicViscosity(Air_ha;T=T[1];P=P[1])  
alpha[1]=ThermalDiffusivity(Air_ha;T=T[1];P=P[1])  
Pr[1]=Prandtl(Air_ha;T=T[1];P=P[1])  
Betha[1]=1/(T[1])
```

1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha_i$	Betha <sub>i</sub>	$k_i$	$\nu_i$	$P_i$ [kPa]	$Pr_i$	$\rho_i$	
0,00009683	0,003346	0,04435	0,00006792	72	0,7015	0,4383	

## ANEXO II

"Fluid: water"

$T[1]=288[\text{K}]$

$P[1]=72[\text{kPa}]$

$\rho[1]=\text{Density}(\text{Water};T=T[1];P=P[1])$

$c_p[1]=C_p(\text{Water};T=T[1];P=P[1])$

The screenshot shows a window titled "Arrays Table" with a "Main" tab. The window contains a table with four columns and one data row. The columns are labeled  $P_i$ ,  $T_i$  [K],  $P_i$  [kPa], and  $cp_i$ . The data row contains the values 999,1, 288, 72, and 4,184. A "Sort" button is visible on the left side of the table.

	$P_i$	$T_i$ [K]	$P_i$ [kPa]	$cp_i$
[1]	999,1	288	72	4,184

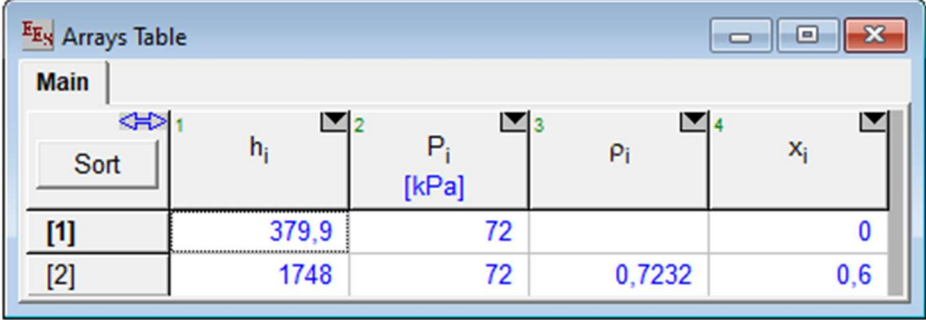
## ANEXO III

```
close all
clear all
clc
x=linspace(0,400,50);
y=127835/189 - (125000*exp(-(51951924412416*x)/283533894697038625))/189 %500 W
%figure (1)
%plot (x,y)
%xlabel('Time [s]')
%ylabel('Temperature [°C]')
y1=252835/189 - (250000*exp(-(51951924412416*x)/283533894697038625))/189 %1000W
y2=125945/63 - (125000*exp(-(51951924412416*x)/283533894697038625))/63 %1500 W
y3=502835/189 - (500000*exp(-(51951924412416*x)/283533894697038625))/189 %2000 W
y4=91+0*x
plot(x,y,x,y1,x,y2,x,y3,x,y4)
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
legend('500 [W]', '1000 [W]', '1500 [W]', '2000 [W]')
title('Temperatura vs Tiempo en estado transitorio')
```

## ANEXO IV

$P[1]=72[\text{kPa}]$   
 $x[1]=0$   
 $h[1]=\text{Enthalpy}(\text{Water};x=x[1];P=P[1])$

$P[2]=72[\text{kPa}]$   
 $x[2]=0,6$   
 $\rho[2]=\text{Density}(\text{Water};x=x[2];P=P[2])$   
 $h[2]=\text{Enthalpy}(\text{Water};x=x[2];P=P[2])$



	1	2	3	4
Sort	$h_i$	$P_i$ [kPa]	$P_i$	$x_i$
[1]	379,9	72		0
[2]	1748	72	0,7232	0,6