

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

*Trabajo de titulación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico*

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN  
HORNO DE CURADO PARA PINTURA ELECTROSTÁTICA”**

**AUTORES:**

CUZCO CANTOS JORGE ESTEBAN

DOMÍNGUEZ OCHOA JUAN MANUEL

**TUTOR:**

Ing. JOHN IGNACIO CALLE SIGUENCIA, PhD.

CUENCA - ECUADOR

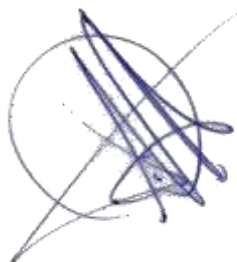
2019

## CESIÓN DE DERECHO DE AUTOR

Nosotros, Cuzco Cantos Jorge Esteban con documento de identificación N.º 0302012497 y Domínguez Ochoa Juan Manuel con documento de identificación N.º 0105817530, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO DE CURADO PARA PINTURA ELECTROSTÁTICA”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2019.



Cuzco Cantos Jorge Esteban

C.I.: 0302012497



Domínguez Ochoa Juan Manuel

C.I.: 0105817530

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO DE CURADO PARA PINTURA ELECTROSTÁTICA”**, realizado por Cuzco Cantos Jorge Esteban y Domínguez Ochoa Juan Manuel obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2019.



---

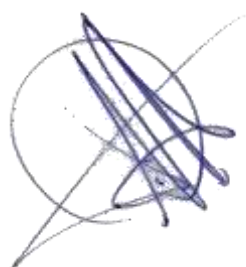
Ing. John Ignacio Calle Sigüencia, PhD.

C.I.: 0102118213

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Cuzco Cantos Jorge Esteban con documento de identificación N.º 0302012497 y Domínguez Ochoa Juan Manuel con documento de identificación N.º 0105817530, autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO DE CURADO PARA PINTURA ELECTROSTÁTICA”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2019.



Cuzco Cantos Jorge Esteban

C.I.: 0302012497



Domínguez Ochoa Juan Manuel

C.I.: 0105817530

## **DEDICATORIA**

A Dios, quien que me ayuda en lo que creo imposible.

A las personas que me vieron e hicieron crecer, mi apoyo y sustento: mis padres.

A mi esposa Fernanda por cada día brindarme alegrías, por su sacrificio y cuidados conmigo, a mi chiquita Martina (mi Pocho) la alegría de mi vida.

Jorge Esteban Cuzco Cantos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Ing. John Calle, por todo el apoyo brindado y el conocimiento compartido, imposible un mejor tutor.

A mi pana Juan, igualmente, imposible un mejor compañero de titulación.

Y a mis maestros, en especial al Ing. Jorge Fajardo por su excelencia en su manera de enseñar.

Jorge Esteban Cuzco Cantos.

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo dedico de manera especial a mis padres, a mi hermano, y a mi hermana, ya que todos ellos siempre me han apoyado y ayudado de una manera incondicional en el transcurso de mi vida personal y académica.

Juan Manuel Domínguez Ochoa.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis agradecimientos a mi madre Marcia Ochoa y a mi padre Ing. Fernando Domínguez por su apoyo, y ayuda incondicional en las distintas etapas y momentos de mi vida.

Agradezco a mi hermano Mateo Fernando y a mi hermana Mará José por estar dispuestos a ayudarme y apoyarme en cualquier momento.

Agradezco a mi compañero de tesis Jorge Cuzco por su amistad a lo largo de nuestra carrera universitaria, como también por sus conocimientos aportados para el desarrollo del presente proyecto.

Agradezco al Ing. John Ignacio Calle Siguencia, PhD. por su gran aporte de conocimientos, y por brindar la ayuda necesaria para el desarrollo del presente proyecto.

Finalmente agradezco a todos mis familiares y amigos, los cuales has estado presentes tanto en el transcurso de mi vida personal, como también en el transcurso de mi vida universitaria.

Juan Manuel Domínguez Ochoa.

## RESUMEN

El presente proyecto técnico se desarrolló para suplir una necesidad puntual dentro de la empresa Talleres Cuzco e Hijos, ya que a finales del año 2018 esta empresa inicio con la implementación de una línea para pintura electrostática, con la cual pretende brindar un acabado superficial óptimo a sus productos. La línea de pintura electrostática consta de dos partes: de una cabina de pintura, y un horno de curado; la empresa mencionada anteriormente realizó la implementación de la cabina de pintura a inicios del año 2019; quedando pendiente la incorporación de la cabina de curado, la misma que debe considerar condiciones de producción propias de la empresa.

El presente trabajo, en su primera parte considera el análisis del problema, se determina las condiciones y restricciones de acuerdo con las características de la empresa, posteriormente se realiza un estudio del estado del arte de los componentes que conforman los distintos tipos de hornos industriales, para con esta base teórica proceder a diseñar el sistema.

Una vez concluido el diseño del sistema, se procede a la construcción utilizando procesos de mecanizado tradicionales, finalmente se realizó la implementación evidenciando un funcionamiento adecuado de todos los componentes, poniendo atención especial en el intercambiador de calor y en el sistema de control. El horno alcanza una temperatura de 210°C, en un tiempo de 30min, y mantiene la misma con una variación de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

## **ABSTRACT**

The present technical project was developed to meet a specific need within the Talleres Cuzco e Hijos company, since at the end of 2018 this company started with the implementation of a line for electrostatic painting, with which it aims to provide an optimum surface finish to their products. The electrostatic painting line consists of two parts: a paint booth, and a curing oven; the aforementioned company carried out the implementation of the paint booth at the beginning of the year 2019; pending the incorporation of the curing cabinet, which must consider production conditions of the company.

The present work, is the first part of the analysis of the problem, which determines the conditions and design restrictions according to the characteristics of the company, then a study of the state of art in detail of the components that make up the different types of industrial furnaces for this theoretical basis proceed to design the system, taking into account the variables that intervene in it, to ensure high efficiency in the equipment;

Once the design of the system was completed, its construction was carried out using the different traditional machining processes, and finally the implementation was carried out, evidencing an adequate functioning of all the components, paying special attention to the heat exchanger, as well as in the control system. The oven reaches a temperature of 210 ° C, in a time of 30 min, and maintains it with a variation of  $\pm 5$  ° C.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Problema.....</b>	<b>2</b>
2.1	<b>Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
2.2	<b>Diagnóstico de la situación actual de la empresa.....</b>	<b>2</b>
2.2.1	<b>Ubicación de la empresa.....</b>	<b>2</b>
2.2.2	<b>Misión de la empresa.....</b>	<b>2</b>
2.2.3	<b>Visión de la empresa.....</b>	<b>2</b>
2.3	<b>Importancia y alcances.....</b>	<b>3</b>
2.4	<b>Delimitación.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>4</b>
3.1	<b>Objetivo general.....</b>	<b>4</b>
3.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Marco Teórico.....</b>	<b>4</b>
4.1	<b>Sistemas de aplicación de pintura para superficies metálicas.....</b>	<b>5</b>
4.1.1	<b>Sistema de pintura por aerógrafo.....</b>	<b>5</b>
4.1.2	<b>Sistema de pintura por soplete (Sistema convencional).....</b>	<b>5</b>
4.1.3	<b>Sistema de pintura por inmersión.....</b>	<b>6</b>
4.1.4	<b>Sistema de pintura electrostática.....</b>	<b>7</b>
4.2	<b>Hornos Industriales.....</b>	<b>13</b>
4.2.1	<b>Hornos industriales, según su fuente de calor.....</b>	<b>13</b>
4.2.2	<b>Hornos Industriales, Continuos y Discontinuos.....</b>	<b>14</b>
4.2.3	<b>Hornos Industriales, según el tipo de combustible.....</b>	<b>14</b>
4.2.4	<b>Hornos Industriales, por recirculación.....</b>	<b>14</b>
4.2.5	<b>Horno Industrial, de Fuego Directo o Fuego Indirecto.....</b>	<b>15</b>
4.2.6	<b>Horno Industrial, según su forma de recuperación de calor.....</b>	<b>15</b>
4.3	<b>Intercambiadores de Calor.....</b>	<b>15</b>
4.3.1	<b>Intercambiadores de Calor, según su construcción.....</b>	<b>16</b>
4.3.2	<b>Intercambiadores de Calor, según su operación.....</b>	<b>17</b>
4.3.3	<b>Intercambiadores de Calor, Paso Simple y Múltiples Pasos.....</b>	<b>19</b>
4.3.4	<b>Intercambiadores de Calor, Regenerativos y No-regenerativos.....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>21</b>
5.1	<b>Diseño del equipo.....</b>	<b>22</b>
5.1.1	<b>Definición de Variables.....</b>	<b>22</b>
5.1.2	<b>Alternativas para el diseño del equipo.....</b>	<b>22</b>
5.1.3	<b>Selección del Intercambiador de Calor.....</b>	<b>23</b>

5.1.4	Selección de materiales para la cabina de curado .....	24
5.1.5	Selección de materiales para el intercambiador de calor .....	26
5.1.6	Dimensionamiento de la cabina de curado.....	27
5.1.7	Diseño térmico de la cabina de curado.....	29
5.1.8	Pérdida de energía en las paredes de la cabina de curado .....	38
5.1.9	Selección del combustible .....	50
5.1.10	Diseño del Intercambiador de Calor .....	52
5.1.11	Determinación de la eficiencia del sistema.....	69
5.1.12	Determinación de la presión requerida por el sistema.....	69
5.1.13	Simulación del sistema .....	83
5.2	Construcción del Horno de curado para pintura electrostática .....	90
5.2.1	Construcción de la cabina de curado.....	91
5.2.2	Construcción Ductos .....	93
5.2.3	Construcción del intercambiador de Calor.....	95
5.3	Implementación del Horno de curado para pintura electrostática.....	97
5.4	Análisis técnico financiero .....	101
5.5	Pruebas y Resultados .....	106
6	Conclusiones .....	108
7	Recomendaciones .....	110
8	Referencias.....	111
9	Anexos .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Talleres Cuzco. ....	3
<b>Figura 2</b> Logo de las carretillas producidas por Talleres Cuzco. ....	3
<b>Figura 3</b> Sistema de pintura por aerógrafo .....	5
<b>Figura 4</b> Sistema de pintura por soplete (Sistema convencional) . ....	6
<b>Figura 5</b> Aplicación sistema de inmersión .....	6
<b>Figura 6</b> Aplicación de pintura electrostática .....	7
<b>Figura 7</b> Composición da la pintura electrostática .....	8
<b>Figura 8</b> Propiedades de las pinturas Poliésteres .....	9
<b>Figura 9</b> Curva de curado de los poliésteres .....	9
<b>Figura 10</b> Propiedades de las pinturas Epóxicas .....	10
<b>Figura 11</b> Curva de curado de los epóxicos .....	10
<b>Figura 12</b> Propiedades de las pinturas Híbridas .....	11
<b>Figura 13</b> Curva de curado de las pinturas híbridas .....	11
<b>Figura 14</b> Pistola de aplicación de pintura electrostática .....	12
<b>Figura 15</b> Sistema de pintura electrostática.....	13
<b>Figura 16</b> Intercambiador de calor de carcasa y tubos .....	16
<b>Figura 17</b> Intercambiador de calor de tipo plato .....	17
<b>Figura 18</b> Intercambiador de calor de flujo paralelo .....	18
<b>Figura 19</b> Intercambiador de Contraflujo.....	18
<b>Figura 20</b> Intercambiador de calor de flujo cruzado .....	19
<b>Figura 21</b> Intercambiador de un solo paso .....	19
<b>Figura 22</b> Intercambiador de múltiples pasos .....	19
<b>Figura 23</b> Intercambiador regenerativo .....	20
<b>Figura 24</b> Intercambiador no-regenerativo.....	20
<b>Figura 25</b> Cuadro Metodológico. ....	21
<b>Figura 26</b> Esquema del Horno de curado para pintura electrostática.....	23
<b>Figura 27</b> Esquema Cabina de Curado.....	25
<b>Figura 28</b> Esquema Intercambiador de Calor.....	26
<b>Figura 29</b> Dimensionamiento de la cabina de curado. ....	28
<b>Figura 30</b> % Exposición vs relación de espaciado .....	28
<b>Figura 31</b> Temperaturas promedio Cuenca – Ecuador.....	28
<b>Figura 32</b> Propiedades Físicas del Acero AISI 1020 .....	31
<b>Figura 33</b> Propiedades de metales sólidos .....	32
<b>Figura 34</b> Propiedades Físicas del Acero Inoxidable AISI 304 .....	34
<b>Figura 35</b> Propiedades de metales sólidos .....	35
<b>Figura 36</b> Propiedades físicas del aire.....	35
<b>Figura 37</b> Propiedades de la atmósfera a gran altitud .....	36
<b>Figura 38</b> Aislantes Térmicos .....	38
<b>Figura 39</b> Desempeño Térmico del Aislante.....	39
<b>Figura 40</b> Dimensionamiento de las paredes.....	39
<b>Figura 41</b> Propiedades físicas del aire.....	40
<b>Figura 42</b> Emisividad distintos materiales .....	44
<b>Figura 43</b> Propiedades físicas acero galvanizado ASTM A653.....	46
<b>Figura 44</b> Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels .....	51
<b>Figura 45</b> Emisión específica de CO2.....	51
<b>Figura 46</b> Características físicas y emisiones.....	51
<b>Figura 47</b> Pesos moleculares.....	52

<b>Figura 49</b> Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N <sub>2</sub> .....	54
<b>Figura 50</b> Disposición Alineada, y Escalonada.....	56
<b>Figura 51</b> Intercambiador de calor final.....	56
<b>Figura 52</b> Quemadores GULLIVER BS2F.....	57
<b>Figura 53</b> Propiedades físicas del aire.....	58
<b>Figura 54</b> Correlaciones del número de Nusselt.....	61
<b>Figura 55</b> Factor de corrección F.....	61
<b>Figura 56</b> Propiedades físicas del aire.....	61
<b>Figura 57</b> Viscosidad cinemática de los gases de combustión.....	62
<b>Figura 58</b> Número de Reynolds Tubería Circular.....	63
<b>Figura 59</b> Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies.....	64
<b>Figura 60</b> Flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado.....	65
<b>Figura 61</b> Analogía resistencias de un tubo.....	65
<b>Figura 62</b> Cámara de combustión solo para P265F.....	66
<b>Figura 65</b> Factor de fricción f y factor de corrección X.....	70
<b>Figura 66</b> Opción 1 Cabina de curado.....	71
<b>Figura 67</b> Opción 1 Flujo de aire interno.....	71
<b>Figura 68</b> Opción 2 Cabina de curado.....	72
<b>Figura 69</b> Opción 2 Flujo de aire interno.....	72
<b>Figura 70</b> Opción 3 Cabina de curado.....	73
<b>Figura 71</b> Opción 3 Flujo de aire interno.....	73
<b>Figura 72</b> Opción 4 Cabina de curado.....	74
<b>Figura 73</b> Opción 4 Flujo de aire interno.....	74
<b>Figura 74</b> Horno de curado.....	75
<b>Figura 75</b> Flujo de aire al interior del Horno.....	75
<b>Figura 77</b> Diámetro hidráulico.....	78
<b>Figura 78</b> Pérdidas por fricción.....	79
<b>Figura 79</b> Ventilador centrífugo Anzola.....	79
<b>Figura 80</b> Viga estructural G100x50x15x3.....	80
<b>Figura 81</b> Tubo cuadrado estructural 50x2.....	81
<b>Figura 82</b> Desplazamiento Estructura Cabina.....	81
<b>Figura 83</b> Esfuerzos Estructura Cabina.....	82
<b>Figura 84</b> Soporte - Guía.....	83
<b>Figura 85</b> Análisis térmico pared.....	84
<b>Figura 86</b> Velocidades Intercambiador Calor.....	85
<b>Figura 87</b> Flujo Intercambiador Calor.....	85
<b>Figura 88</b> Horno Curado Pintura Electroestática.....	86
<b>Figura 89</b> Tiempo de calentamiento 1.....	87
<b>Figura 90</b> Tiempo de calentamiento 2.....	89
<b>Figura 91</b> Esquema proceso de fabricación.....	90
<b>Figura 92</b> Estructura Cabina de Curado.....	91
<b>Figura 93</b> Doblado de lámina.....	91
<b>Figura 94</b> Estructura Cabina de Curado final.....	92
<b>Figura 95</b> Aplicación pared aislante.....	92
<b>Figura 96</b> Aplicación pared aislante.....	93
<b>Figura 97</b> Ductos de distribución.....	93
<b>Figura 98</b> Campana.....	94

<b>Figura 99</b> Cabina de curado, ductos, y campanas. ....	94
<b>Figura 100</b> Intercambiador de Calor. ....	95
<b>Figura 101</b> Carcasa Intercambiador de Calor.....	95
<b>Figura 102</b> Horno de curado para pintura electrostática. ....	96
<b>Figura 103</b> Sistema combustible GLP.....	97
<b>Figura 104</b> Sistema combustible GLP Acoplado. ....	98
<b>Figura 105</b> Caja de control.....	99
<b>Figura 106</b> Instalación interna caja de control. ....	99
<b>Figura 107</b> Curva Prueba Sistema y Simulación.....	106

## **1 Introducción**

En la actualidad distintas empresas a nivel nacional e internacional se encuentran realizando la implementación y adquisición de nuevas tecnologías para aplicarlas dentro de sus líneas de producción o dentro de sus sistemas de producción en general, con la finalidad de mejorar y optimizar sus sistemas, para de esta manera reducir costos de producción, tiempos de producción, y a su vez reducir la contaminación hacia el medio ambiente.

La empresa Talleres Cuzco e Hijos se dedica a la fabricación de una gran variedad de objetos en lámina metálica. Su principal producto son las carretillas metálicas de marca ETERNA, las cuales son utilizadas principalmente en el área de la construcción y jardinería.

Los productos mencionados anteriormente una vez fabricados y ensamblados, son llevados al área de pintura para aplicarles un recubrimiento superficial, el mismo que da el acabado final al objeto. Anteriormente este proceso se lo realizaba utilizando el sistema de pintura por soplete (tradicional), actualmente la empresa se encuentra en una fase de implementación de un sistema de pintura electrostática, ya que con este tipo de sistema se logra una reducción significativa en la contaminación por partículas sólidas, como también reduce los tiempos de curado de los productos tras la aplicación de la pintura. Otro punto muy importante, es que al utilizar este tipo de pintura los objetos obtienen un mejor acabado superficial y mejores características como la resistencia a la intemperie. También es importante considerar que el sistema cuenta con un recolector de partículas sólidas en la cabina de pintura, con lo que es posible recuperar y reciclar un porcentaje considerable de partículas, para posteriormente ser reutilizadas dentro del proceso.

## **2 Problema**

### **2.1 Antecedentes**

Actualmente Talleres Cuzco e Hijos produce un promedio de 500 caretillas y piezas de forja, dentro de la ciudad de Cuenca existen 3 talleres que se dedican a la producción de caretillas, por lo cual existe una competencia notable dentro de este mercado. Talleres Cuzco e Hijos está realizando la implementación de un sistema de pintura electrostática dentro de su línea de producción, y así ofrecer un valor agregado al acabado superficial de sus productos; actualmente dispone de una cabina para pintura electrostática, pero requiere de un horno de curado para completar la línea de producción, ya que sin este equipo no se puede completar el proceso para obtener el acabado superficial requerido.

Con lo antes planteado se podría considerar la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible implementar un horno de curado para pintura electrostática en Talleres Cuzco e Hijos, que cumpla con los requerimientos técnicos de la empresa, utilizando materias primas de fácil adquisición en el mercado local, y que garantice alta eficiencia en su funcionamiento?

### **2.2 Diagnóstico de la situación actual de la empresa**

#### **2.2.1 Ubicación de la empresa**

Talleres Cuzco e Hijos, ubicado en la ciudadela Uncovía, cantón Cuenca, provincia del Azuay ofrece a sus clientes carretillas ETERNA, marca reconocida a nivel regional y nacional; estos productos presentan una gran resistencia para cualquier tipo de trabajo, en el campo de la construcción o en jardinería.

#### **2.2.2 Misión de la empresa**

Entregar productos de alta calidad adaptándonos a las verdaderas necesidades del cliente, con el fin de obtener satisfacción del mismo tanto por la calidad como por el costo del producto, es por ello que se trabaja con un grupo humano de alta capacidad, y con tecnología que permita ser competitivos en el mercado.

#### **2.2.3 Visión de la empresa**

Ser una empresa líder de su mercado en diseño, producción y calidad de servicios enfocado el esfuerzo hacia nuestros clientes, adaptándonos a sus necesidades, y presentando productos de calidad y alta duración.

En la Figura 1, se puede apreciar los exteriores, de Talleres Cuzco, en la Figura 2 se puede observar el logo utilizado para la distribución de las carretillas metálicas.



*Figura 1 Talleres Cuzco.*



*Figura 2 Logo de las carretillas producidas por Talleres Cuzco.*

### **2.3 Importancia y alcances**

Ya que la línea de pintura electrostática actualmente se encuentra incompleta, es de gran importancia realizar la implementación de un horno de curado adecuado para dicho proceso, teniendo en cuenta los requerimientos técnicos de la empresa, como también todas las variables que influyen sobre el equipo, y así completar la línea de pintura de una forma adecuada, con un equipo que cumple con todos los requisitos técnicos.

### **2.4 Delimitación**

El presente proyecto puede tener un alcance macro, ya que este tipo de sistema puede ser implementado dentro la línea de producción en distintas industrias que se encuentran en el sector productivo a nivel nacional.



### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Diseñar, construir, e implementar, un horno de curado para pintura electrostática, considerando el tipo de energía a utilizar y la capacidad de producción de la empresa en la que se realizará la intervención, para garantizar flujo adecuado de producción, fortalecer la calidad del producto.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- ✚ Diagnosticar la situación actual de la empresa, y de los sistemas de aplicación de pintura para superficies metálicas para definir los parámetros de diseño requeridos.
  
- ✚ Diseñar el sistema, y modelar las partes críticas, utilizando software de ingeniería como AUTOCAD, INVENTOR y SOLIDWORKS, para garantizar la funcionalidad, selección y dimensionamiento de los componentes del sistema.
  
- ✚ Construir el equipo considerando procesos de manufactura convencionales y realizar pruebas de funcionamiento para garantizar la eficiencia del mismo.
  
- ✚ Desarrollar el análisis técnico financiero, que permita establecer los costos de construcción e implementación del sistema.

### **4 Marco Teórico**

En el presente estudio se abordará en primer lugar el análisis de la realidad actual de la empresa, para realizar un diagnóstico mediante el cual se definirán las variables que permitirán un diseño eficiente del sistema; posteriormente se realizará un estudio del estado del arte de equipos utilizados para curado de pintura electrostática que posibilitará definir la tecnología a utilizar.

## **4.1 Sistemas de aplicación de pintura para superficies metálicas**

### **4.1.1 Sistema de pintura por aerógrafo**

El sistema de pintura por aerógrafo, para su funcionamiento requiere de un compresor de aire comprimido o una lata de aire comprimido, como también de el volumen de pintura requerida. Este tipo de sistema permite controlar el flujo de aire mediante un pulsador incorporado en el equipo. Este sistema se lo puede apreciar en la Figura3 [1] [2].



*Figura 3 Sistema de pintura por aerógrafo [1].*

Este tipo de sistema se usa principalmente, cuando se desea realizar varios cambios de pintura durante el proceso de deposición y a su vez se utiliza para realizar trabajos de alta precisión como detalles [1].

### **4.1.2 Sistema de pintura por soplete (Sistema convencional)**

El sistema de pintura por soplete, en la actualidad es uno de los sistemas para deposición de pintura más común ya que es versátil y fácil de manipular. Para el correcto funcionamiento de este sistema, se requiere de un compresor de aire comprimido, como también del volumen de pintura requerido; consta de un gatillo, una tobera, y un recipiente donde se realiza la colocación de la pintura líquida, los componentes mencionados anteriormente suelen ser metálicos [2] [3].



*Figura 4 Sistema de pintura por soplete (Sistema convencional) [3].*

Al realizar el accionamiento del gatillo, se genera la apertura de una válvula interna, la cual regula el ingreso del aire comprimido proveniente del compresor, de esta manera permitiendo controlar la velocidad de salida de la pintura como su cantidad, se puede observar este sistema en la Figura 4 [3].

#### **4.1.3 Sistema de pintura por inmersión**

El sistema de pintura por inmersión es un proceso electroquímico, utilizado principalmente, para realizar el pintado de grandes cantidades de estructuras complejas, pues en este sistema la pieza se sumerge por completo en un baño, para realizar la aplicación de las partículas de pintura generalmente se utiliza pintura a base de agua, y una carga de corriente directa. En la Figura 5, se muestra la aplicación de pintura por inmersión [4] [1].



*Figura 5 Aplicación sistema de inmersión [4].*

#### 4.1.4 Sistema de pintura electrostática

El sistema de pintura electrostática consiste en aplicar un voltaje a las partículas de pintura que se encuentran en forma de polvo, posteriormente mediante una fuerza electrostática se genera la adherencia de la pintura sobre la superficie que se desea pintar, dicha pintura posee mejores características en comparación a las pinturas tradicionales, al aportar una mayor durabilidad y resistencia a impactos [1] [2]. A continuación, se nombran sus principales ventajas:

- ✚ No contienen ningún tipo de solventes
- ✚ Es fácil de realizar su procesamiento, como su limpieza
- ✚ Se puede aplicar en una gran variedad de sustratos
- ✚ No contienen compuestos orgánicos volátiles
- ✚ Existe una gran gama de colores



*Figura 6 Aplicación de pintura electrostática [2].*

En la Figura 6, se aprecia la pistola de pintura electrostática en funcionamiento, este tipo de pintura en polvo está compuesto por distintos compuestos, los cuales se detallará a continuación.

➤ Resinas:

Las resinas, son materiales sólidos que provienen de distintas fuentes vegetales, y delimitan el rendimiento de la pintura [5] [6].

➤ Pigmentos:

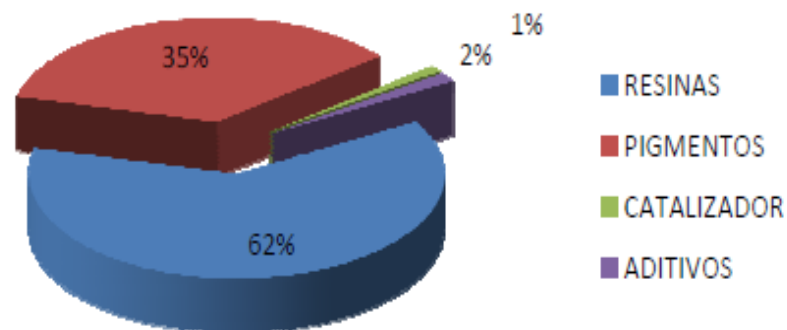
Los pigmentos son los que generan el poder de recubrimiento, como también los colores, el acabado, la textura, y el brillo de la pintura [5] [6].

➤ Agentes de curado:

Los agentes de curado llegan a reaccionar cuando están en contacto con la resina para formar una película continua y protectora [5] [6].

➤ Aditivos:

Los aditivos ayudan a que se genere un mejor desempeño y terminado de la pintura [5] [6].



*Figura 7 Composición da la pintura electrostática [6].*

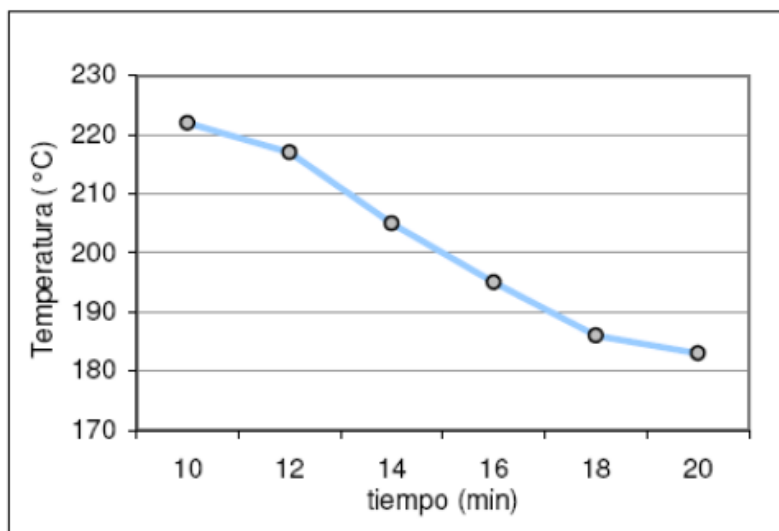
Existen distintos tipos de pintura electrostática como se puede observar en la Figura 7. A continuación, se detallará sobre cada uno.

➤ Poliéster:

La pintura poliéster, se recomienda para aplicar en interiores, como en exteriores, esto se debe a que presenta una gran resistencia ante las distintas condiciones climáticas, y por su excelente adherencia sobre las superficies metálica. En la Figura 8 y Figura 9, se muestran las propiedades y tiempos de curado para esta pintura [1] [5].

<b>POLIESTER</b>	
<b>CONDICIONES DE APLICACIÓN</b>	
<b>Peso Específico</b>	1.5 - 1.8 g/cm <sup>3</sup>
<b>Método de Aplicación</b>	Corona
<b>Voltaje</b>	60 - 70 kV
<b>Espesor</b>	60 micras
<b>Rendimiento Teórico</b>	9 - 11 m <sup>2</sup> /kg
<b>Superficies Donde se Puede Aplicar</b>	Acero laminado en frío    Acero Electro galvanizado Aluminio                                  Vidrio Cerámica
<b>Preparación Superficial</b>	Desengrasado                          Limpieza Química                                  Fosfatizado con Zinc o Hierro

*Figura 8 Propiedades de las pinturas Poliésteres [6].*



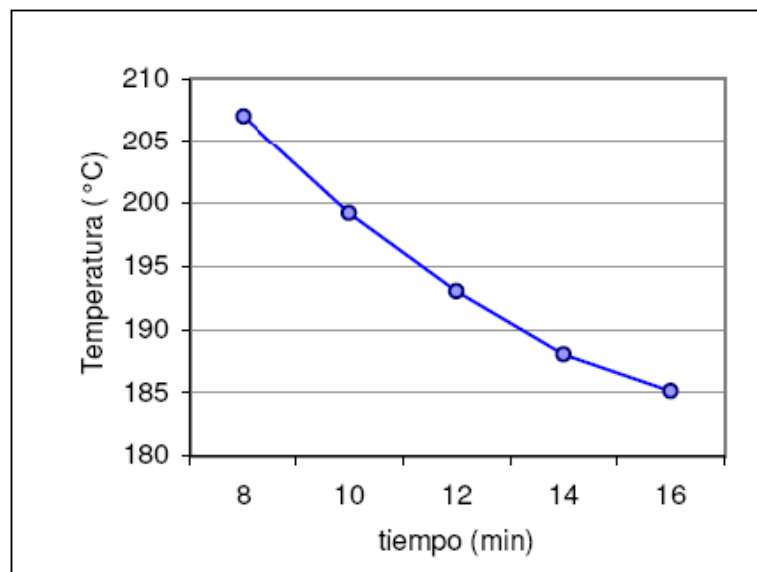
*Figura 9 Curva de curado de los poliésteres [5].*

➤ Epóxica:

Se fabrican a partir de resina epóxica, esto proporciona que la pintura tenga buena resistencia a la corrosión, y agentes químicos. Este tipo de pintura no se recomienda para uso en exteriores, intemperie, o superficies expuestas a rayos UV (ultravioleta). En la Figura 10 y Figura 11 se muestran las propiedades y tiempos de curado para esta pintura [2] [5].

<b>EPOXI</b>	
<b>CONDICIONES DE APLICACIÓN</b>	
<b>Peso Específico</b>	1.5 - 1.7 g/cm <sup>3</sup>
<b>Método de Aplicación</b>	Corona
<b>Voltaje</b>	60 - 70 kV
<b>Espesor</b>	60 micras
<b>Rendimiento Teórico</b>	9 - 11 m <sup>2</sup> /kg
<b>Superficies Donde se Puede Aplicar</b>	Acero laminado en frío    Acero Galvanizado    Aluminio    Magnesio
<b>Preparación Superficial</b>	Desengrasado    Limpieza Química    Fosfatizado con Zinc o Hierro

*Figura 10 Propiedades de las pinturas Epóxicas [6].*



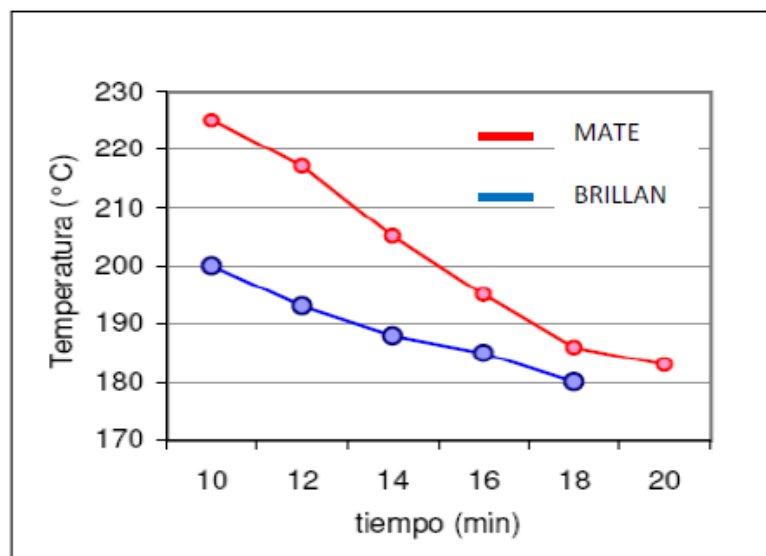
*Figura 11 Curva de curado de los epóxicos [5].*

➤ Híbridos:

Las pinturas híbridas, combinan las propiedades tanto de las resinas tipo poliéster, como de las epóxicas, esta puede variar sus porcentajes, por ejemplo: 50/50, 60/40, 70/30 respectivamente, estas pinturas se utilizan principalmente para la realización de trabajos decorativos para interiores, no se recomienda para exteriores. En la Figura 12 y Figura 13, se muestran las propiedades y tiempos de curado para esta pintura [3] [5].

<b>HIBRIDOS</b>	
<b>CONDICIONES DE APLICACIÓN</b>	
<b>Peso Específico</b>	1.5 - 1.8 g/cm <sup>3</sup>
<b>Método de Aplicación</b>	Corona
<b>Voltaje</b>	60 - 70 kV
<b>Espesor</b>	60 micras
<b>Rendimiento Teórico</b>	9 - 11 m <sup>2</sup> /kg
<b>Superficies Donde se Puede Aplicar</b>	Acero laminado en frío    Acero Galvanizado    Aluminio Magnesio
<b>Preparación Superficial</b>	Desengrasado Limpieza Química Fosfatizado con Zinc o Hierro

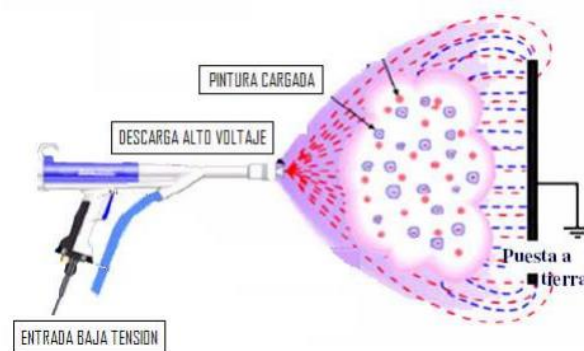
*Figura 12 Propiedades de las pinturas Híbridas [6].*



*Figura 13 Curva de curado de las pinturas híbridas [5].*



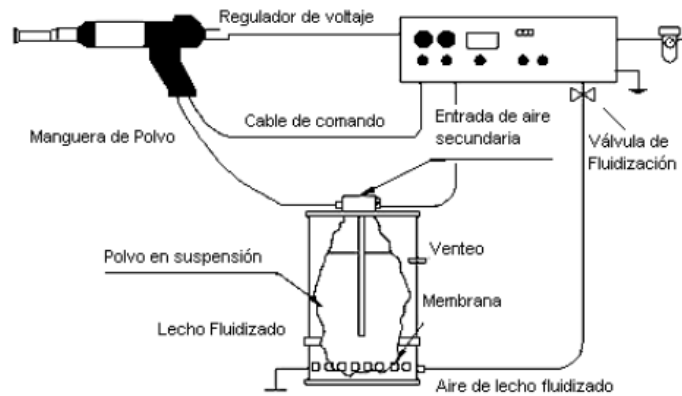
El principio de funcionamiento del sistema de pintura electrostática consiste en: la pintura electrostática es transportada por medio de mangueras gracias a una corriente de aire comprimido a alta velocidad que genera un efecto de succión, las partículas de la pintura electrostática son dirigidas directamente hacia la pistola de aplicación, que son sistemas de tipo corona y están cargadas eléctricamente con valores de voltaje elevados, suelen tener valores de 60KV a 90KV y con corrientes muy bajas, esto asegura que no exista la posibilidad de un choque eléctrico. Este procedimiento carga negativamente a las partículas de la pintura electrostática, que son atraídas hacia la superficie metálica y se encuentra conectada a tierra. En la Figura 14, se puede observar un esquema simulando el funcionamiento de aplicación de las partículas de pintura, sobre una superficie [1] [5] [3].



*Figura 14* Pistola de aplicación de pintura electrostática [7].

Este tipo de sistema para deposición de pintura electrostática consta de los siguientes componentes, como se puede observar en la Figura 15.

- ✚ Contenedor para la pintura electrostática
- ✚ Inyectores
- ✚ Mangueras
- ✚ Pistolas con sistema de alta tensión
- ✚ Panel de control



*Figura 15 Sistema de pintura electrostática [6].*

## 4.2 Hornos Industriales [8] [7] [6]

En la actualidad, a nivel industrial los hornos son muy utilizados, pues permiten realizar una transferencia de calor a una gran variedad de objetos. Generalmente se utilizan para realizar fundición de distintos metales, operando a temperaturas mayores a los 1000°C. Otra de sus aplicaciones dentro del área industrial se enfoca en el precalentamiento de materiales a ser conformados en distintos procesos como pueden ser: extrusión, doblado, laminado, forjado, y rolado. Para este tipo de proceso se suele trabajar con temperaturas entre los 1000°C y 1250°C.

En el área de tratamientos térmicos, estos equipos son utilizados para alcanzar temperaturas por debajo de los 1000°C, se utilizan en procesos de recocido, revenido, nitrurado, entre otros. Los hornos a nivel industrial, que trabajan a temperaturas menores a los 600°C, se los conoce como hornos de baja temperatura, sus principales aplicaciones son los procesos de secado, y polimerización. En el presente trabajo, se dará énfasis en el estudio de los hornos industriales de baja temperatura, ya que en el curado de pintura electrostática oscilan entre los 150°C y 200°C.

### 4.2.1 Hornos industriales, según su fuente de calor

En este tipo de equipos, sus fuentes de calor son de dos tipos: de combustión, y de conversión de energía eléctrica a calor. A nivel industrial los hornos con fuentes de calor por combustión son los que más demanda tienen, por sus costos operativos que son menores a comparación de los hornos con fuentes de calor de conversión [9] [8].

#### **4.2.2 Hornos Industriales, Continuos y Discontinuos**

➤ Continuos

Este tipo de horno industrial tienen la característica de realizar el movimiento del material, mientras se genera una variación de la temperatura (en función del desplazamiento la temperatura varía). El movimiento del material en este tipo de hornos industriales se genera mediante bandas transportadoras o carros. Generalmente cuentan con cinco zonas de control, estas pueden variar según la carga a utilizar, y del diseño [10] [8].

➤ Discontinuos

Este tipo de horno industrial tienen la característica de constar con un punto máximo de temperatura para operación. Generalmente los materiales son introducidos de forma manual, o con la ayuda de un mecanismo automatizado. es más económico para procesos de producción discontinua [10] [8].

#### **4.2.3 Hornos Industriales, según el tipo de combustible**

Actualmente en el mercado de equipos industriales existen quemadores duales, los cuales tienen la capacidad de quemar dos tipos de combustibles: Gas o Diesel. Otro sistema utilizado en la actualidad, son los hornos industriales calentados por resistencias eléctricas, este tipo de sistema genera pérdidas de calor mínimas. Para procesos de alta producción a nivel industrial, no se utilizan este tipo de sistemas, ya que su mayor inconveniente es su costo operativo. Existe otros métodos de calentamiento, como: calentamiento electromagnético, microondas, radiofrecuencia, láser, y plasma; pero los dos mencionados anteriormente, son los más utilizados en la actualidad [7] [8].

#### **4.2.4 Hornos Industriales, por recirculación**

Dentro de este tipo de hornos industriales se encuentran los que trabajan a temperaturas de operación bajas, por debajo de los 600°C, en su mayoría este tipo de hornos constan de un sistema de recirculación de gases. El tener implementado este sistema se genera un ahorro de energía y una uniformidad de la temperatura dentro del mismo [9] [8].

#### **4.2.5 Horno Industrial, de Fuego Directo o Fuego Indirecto**

➤ Fuego Directo

Para que un horno industrial sea de fuego directo la llama de la combustión como sus gases, deben circular sobre la carga que se encuentra en su interior. Este tipo de hornos industriales son utilizados para trabajar con temperaturas de operación elevadas [7] [8].

➤ Fuego Indirecto

Para que un horno industrial sea de fuego indirecto la llama de combustión como sus gases no deben circular directamente sobre la carga que se encuentra en su interior. Este tipo de hornos se suelen utilizar tubos radiales o intercambiadores de calor para obtener un funcionamiento óptimo [7] [8].

#### **4.2.6 Horno Industrial, según su forma de recuperación de calor**

Los hornos industriales que cuentan con sistemas de recuperación de calor se los conoce generalmente con el nombre de hornos recuperativos u hornos regenerativos [9] [8].

En este caso en particular, el aire precalentado generado por la combustión puede ser calentado utilizando recuperadores. Estos son ubicados en la línea de corriente de aire frío, para de esta manera transmitir el calor generado anteriormente [9] [8].

#### **4.3 Intercambiadores de Calor**

“Un intercambiador de calor es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido [11]”.

Las principales razones por las cuales se utilizan este tipo de componentes son las siguientes [11] [12]:

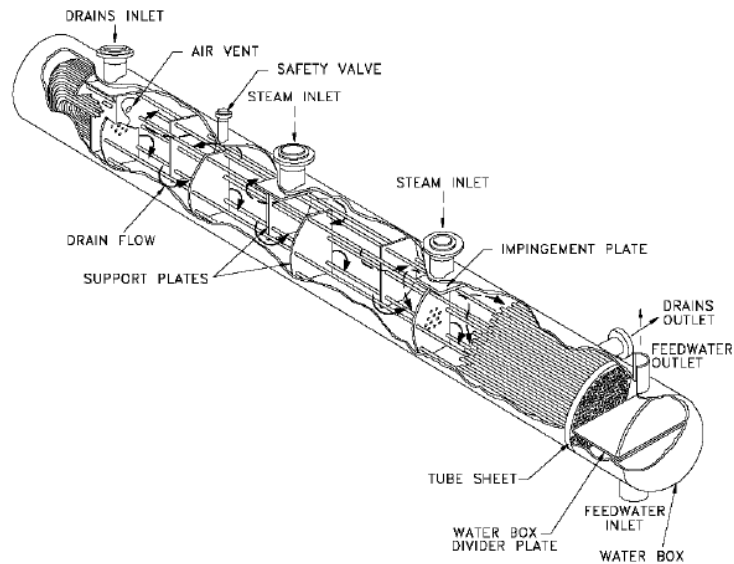
- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura.

### 4.3.1 Intercambiadores de Calor, según su construcción

Los Intercambiadores de calor, pueden tener dos tipos de construcción, de tubo y carcaza, o plato [9] [11].

#### ➤ Tubo y Carcaza

La construcción de tubo y carcaza es el tipo de construcción más básico y el más común dentro de los intercambiadores de calor industriales.



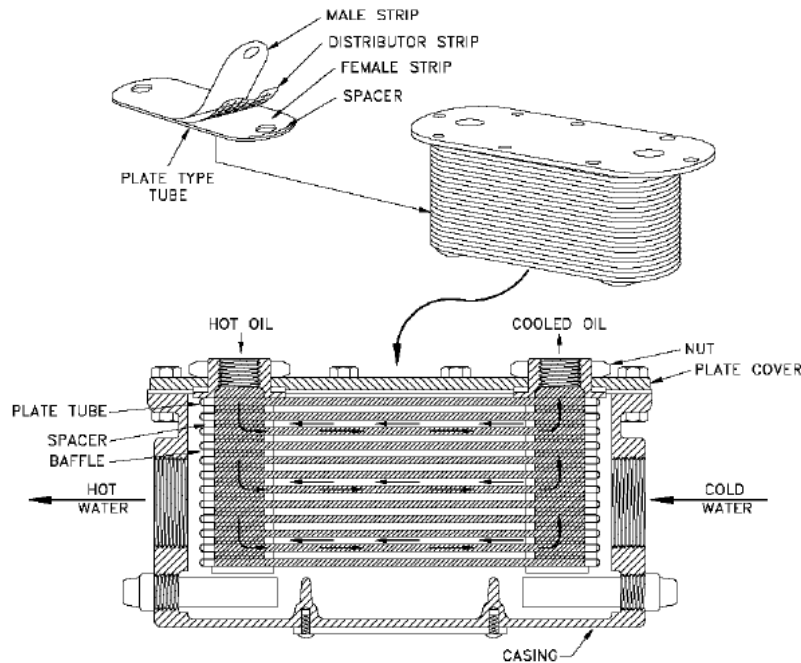
*Figura 16 Intercambiador de calor de carcasa y tubos [9].*

El presente intercambiador de calor consta de un grupo de tubos en un contenedor, como se muestra en la Figura 16, se nombra carcasa, el flujo de fluido interno, se lo suele denominar flujo interno, y el flujo que se encuentra en el interior del contenedor, se lo conoce como fluido de carcaza o fluido externo [11] [9].

#### ➤ Plato

Este tipo de intercambiador de calor consta de placas en vez de tubos para realizar la separación de fluidos caliente y frío, estos fluidos se alternan entre las distintas placas, como se puede apreciar en la Figura 17. Debido a la superficie de las placas, se genera una gran transferencia de calor a cada uno de los fluidos, en comparación al intercambiador de calor de carcaza y tubos, este es capaz de transferir una mayor cantidad de calor [11] [8].

Este intercambiador de calor, no se utiliza a gran escala, porque no se puede realizar un sellado confiable entre las juntas que existen entre las placas, se utiliza principalmente para aplicaciones que generen presiones pequeñas [11] [9].



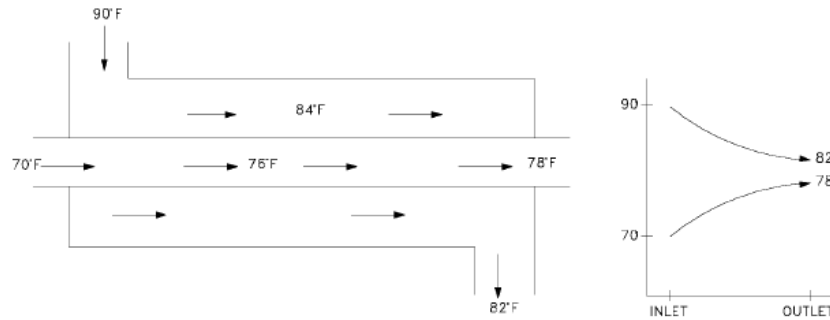
*Figura 17 Intercambiador de calor de tipo plato [11].*

#### 4.3.2 Intercambiadores de Calor, según su operación

Los intercambiadores de calor pueden variar según la dirección relativa que puede existir entre los dos flujos de fluido, estos pueden ser: Flujo Paralelo, Contraflujo, y Flujo Cruzado [9].

##### ➤ Flujo Paralelo

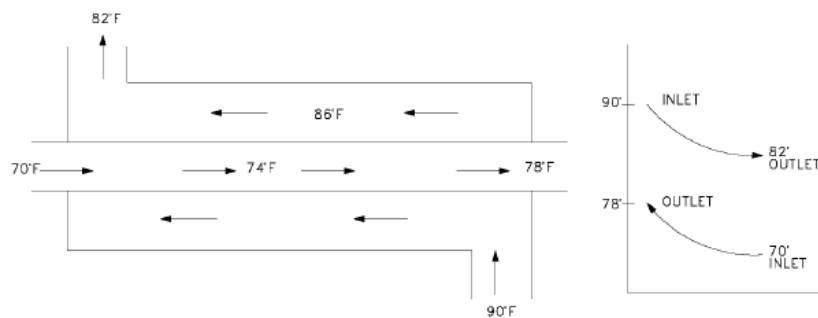
Este tipo de flujo se genera cuando, el flujo interno y el externo (carcaza) fluyen en la misma dirección. Este fenómeno se produce cuando ambos fluidos ingresan por el mismo extremo, y presentan una diferencia de temperaturas elevadas, así el calor del fluido más caliente se transfiere al fluido de menor temperatura. La temperatura del fluido de menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido de mayor temperatura. En la Figura 18, se puede apreciar un esquema del funcionamiento para un Intercambiador de calor de flujo paralelo [11] [9].



**Figura 18** Intercambiador de calor de flujo paralelo [11].

➤ **Contraflujo**

Este tipo de flujo se genera cuando ambos fluidos se encuentran fluyendo en la misma dirección, pero en sentido opuesto. Los fluidos ingresan al intercambiador de calor, por entradas independientes, en este caso, la temperatura del fluido con la temperatura más baja llega a aproximarse a la del fluido a mayor temperatura. Este tipo de intercambiador de calor es uno de los más eficientes por la característica mencionada anteriormente. En la Figura 19, se puede apreciar un esquema del funcionamiento para un Intercambiador de contraflujo [11] [9].



**Figura 19** Intercambiador de Contraflujo [11].

➤ **Flujo Cruzado**

En este caso en particular, uno de los dos fluidos debe fluir perpendicularmente en relación con el segundo fluido. Este tipo de intercambiadores de calor, son utilizados principalmente cuando uno de estos dos fluidos presenta un cambio de fase. Una gran ventaja de este tipo de intercambiador de calor es el poder condensar grandes volúmenes de vapor de agua. En la Figura 20, se puede apreciar un esquema del funcionamiento para un Intercambiador de calor de flujo cruzado [11] [12]. “En la actualidad, la mayoría de los intercambiadores de calor no son puramente de flujo paralelo, contraflujo, o flujo cruzado; estos son comúnmente una combinación de los dos o tres tipos de intercambiador [11].”

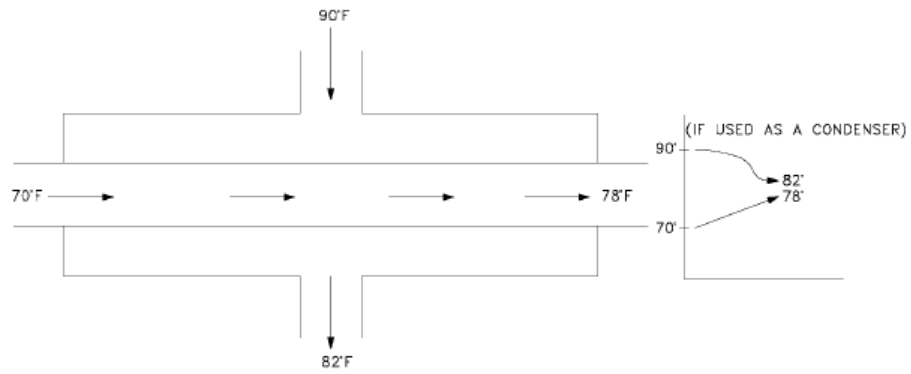


Figura 20 Intercambiador de calor de flujo cruzado [11].

### 4.3.3 Intercambiadores de Calor, Paso Simple y Múltiples Pasos

#### ➤ Paso Simple

“Sí el fluido sólo intercambia calor en una sola vez, se denomina intercambiador de calor de paso simple o de un solo paso [11].”

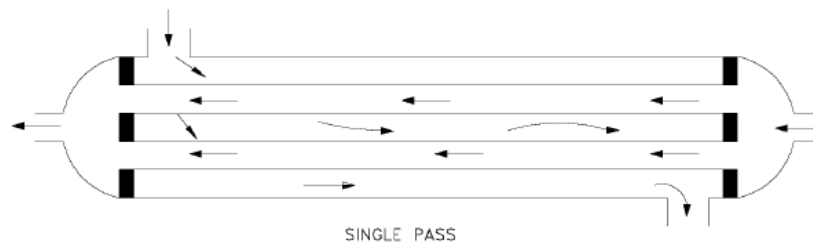


Figura 21 Intercambiador de un solo paso [11].

En la Figura 21, se puede apreciar un esquema del funcionamiento para un Intercambiador de un solo paso.

#### ➤ Múltiples Pasos

“Cuando los fluidos del intercambiador intercambian calor más de una vez, se denomina intercambiador de múltiples pasos [11].”

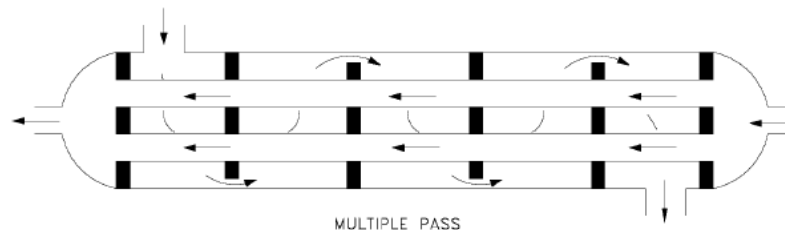


Figura 22 Intercambiador de múltiples pasos [11].

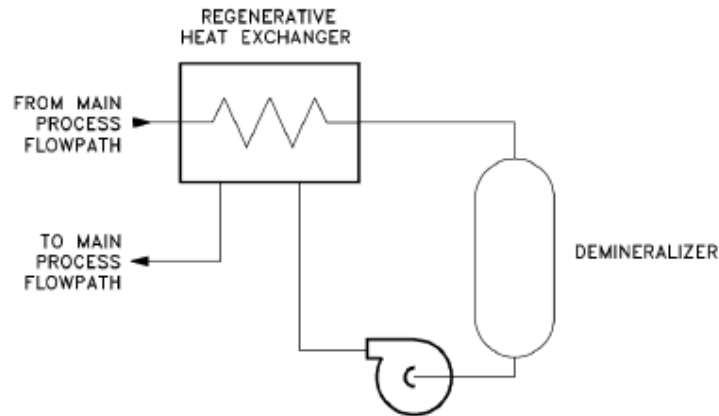
En la Figura 22, se puede apreciar un esquema del funcionamiento para un Intercambiador de múltiples pasos.



#### 4.3.4 Intercambiadores de Calor, Regenerativos y No-regenerativos

##### ➤ Regenerativos

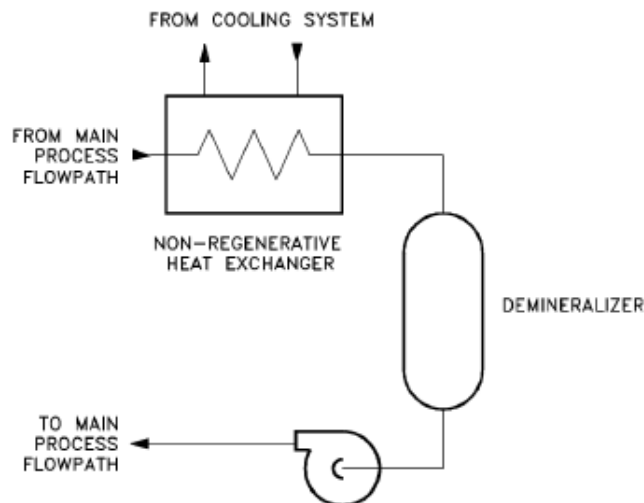
“Los intercambiadores de calor regenerativos usan el mismo fluido para calentar y enfriar [11].” En la Figura 23, se puede apreciar un esquema del funcionamiento para un Intercambiador regenerativo.



*Figura 23 Intercambiador regenerativo [8].*

##### ➤ No-regenerativos

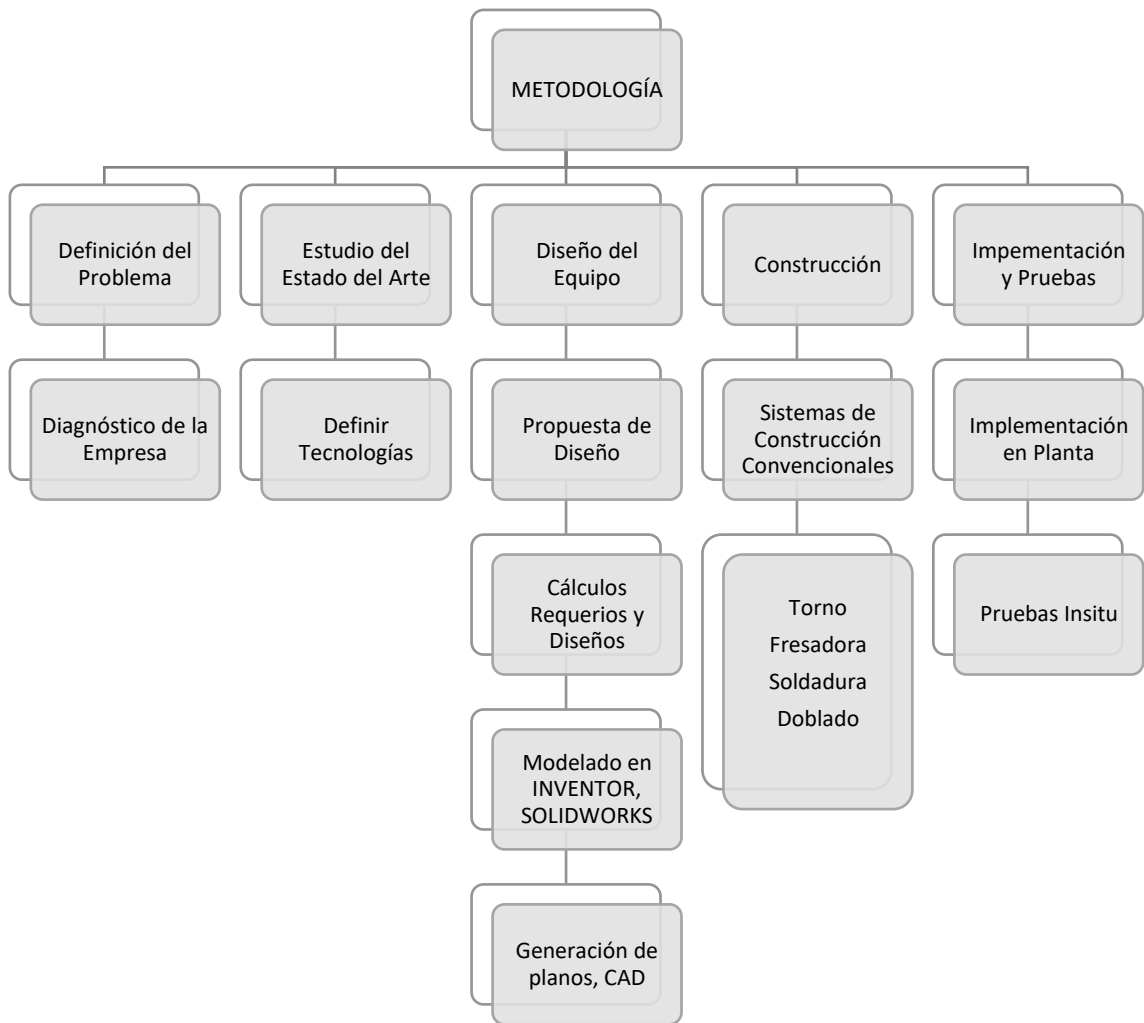
“Los intercambiadores de calor no-regenerativos usan fluidos separados para calentar y enfriar [11].” En la Figura 24, se puede apreciar un esquema del funcionamiento para un Intercambiador no-regenerativo.



*Figura 24 Intercambiador no-regenerativo [11].*

## 5 Metodología

En la Figura 25, se puede apreciar la metodología a seguir para la realización del presente proyecto. A continuación, se desarrollará detalladamente cada punto que conforma el Cuadro Metodológico de la Figura 25. Cabe destacar, que los temas: Definición del Problema y Estudio del Estado del Arte, ya fueron tratados anteriormente.



**Figura 25** Cuadro Metodológico.

**Fuente:** Autores.

## 5.1 Diseño del equipo

### 5.1.1 Definición de Variables

- ✚ Producción semanal de 128 carretillas
- ✚ El sistema debe ubicarse en un área máxima de 3m<sup>2</sup>
- ✚ Los materiales utilizados, no deben sufrir oxidación o corrosión
- ✚ Rango de temperatura de operación: 150°C a 220°C
- ✚ Sistema de control automático de temperatura

### 5.1.2 Alternativas para el diseño del equipo

Para este caso en particular, la pintura aplicada, es una pintura poliéster, la misma es idónea para objetos que van a ser utilizados en exteriores.

Las temperaturas para el curado de la pintura electrostática poliéster, oscilan entre los 185°C - 220°C, el horno de curado para pintura electrostática, debe ser un horno de baja temperatura, que opera a temperaturas por debajo de los 600°C.

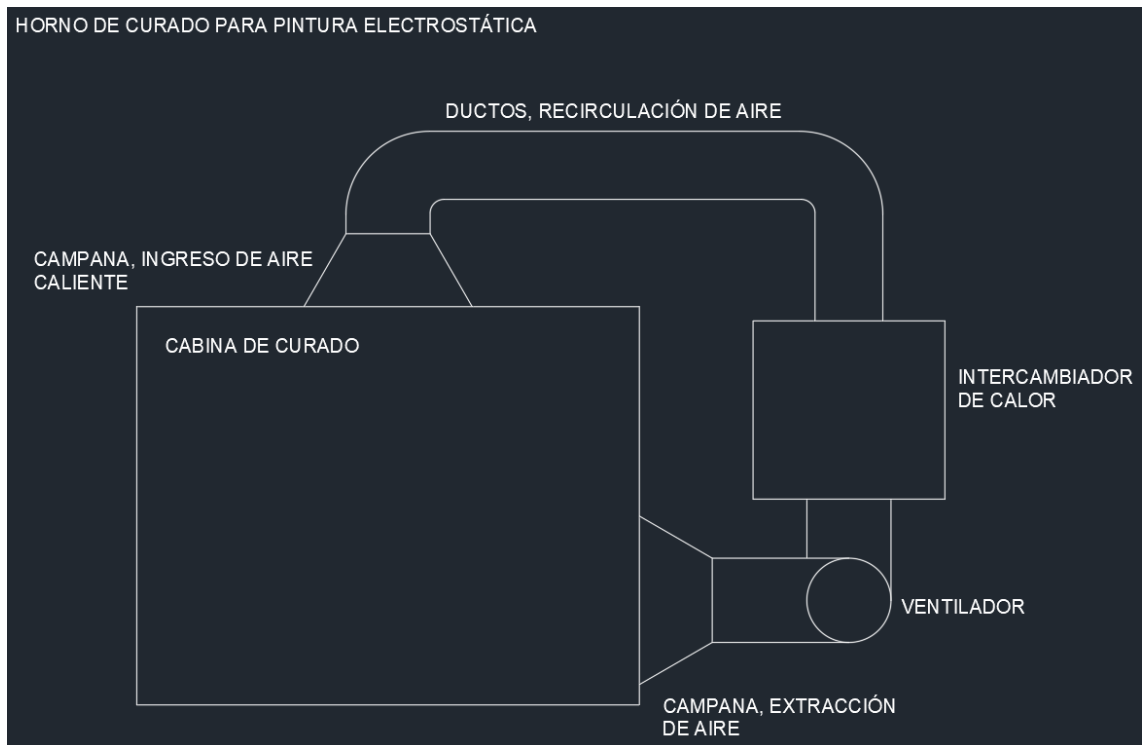
Este tipo de equipos funcionan con el principio de convección, para realizar la recirculación del aire caliente, dentro de la cabina de curado. Para el diseño de este equipo, existen dos posibles alternativas: Horno de convección de llama directa (H.C.D.), y el Horno de convección con Intercambiador de Calor (H.C.I.C.). Para la selección del sistema adecuado, se realizó una tabla de ponderación, como se puede observar en la Tabla 1.

*Tabla 1 Matriz de ponderación, sistema de calentamiento.*

*Fuente: Autores.*

Aspectos	Ponderación	H.C.D.	H.C.I.C.
Técnicos	60	42	56
Control de parámetros	25	20	24
No contaminación al producto	25	15	23
Versatilidad	10	7	9
Operacionales	40	34	37
Seguridad	25	23	24
Fácil manejo del equipo	15	11	13
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>76</b>	<b>93</b>

Como se puede observar en la Tabla 1, el sistema de calentamiento idóneo para este equipo es un intercambiador de calor. En la Figura 26, se puede observar un esquema con las partes principales, que van a conformar el equipo.



*Figura 26 Esquema del Horno de curado para pintura electrostática.*

*Fuente: Autores.*

### 5.1.3 Selección del Intercambiador de Calor

Para realizar la selección del intercambiador de calor, se utilizará una matriz de ponderación, se puede apreciar en la Tabla 2.

*Tabla 2 Matriz de ponderación, intercambiadores de calor.*

*Fuente: Autores.*

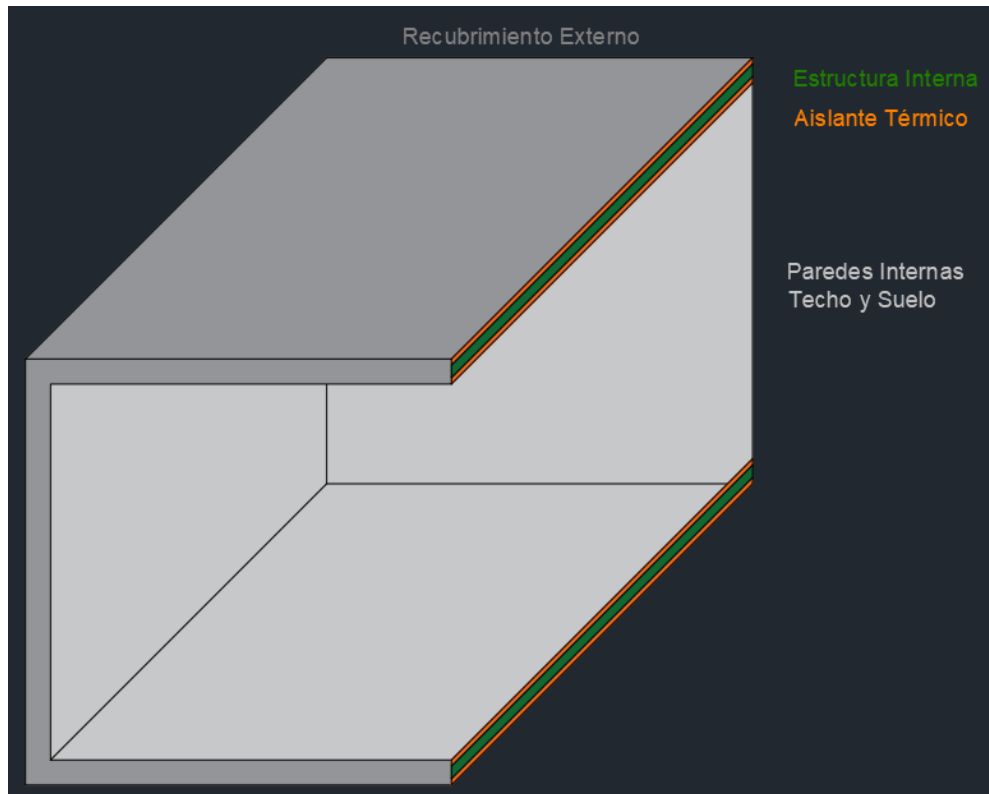
Aspectos	Ponderación	Tubo y Carcaza	Plato
<b>Técnicos</b>	<b>100</b>	<b>94</b>	<b>75</b>
<b>Menor complejidad de construcción</b>	30	27	23
<b>Sellado confiable entre juntas</b>	35	34	25

<b>Soporta presiones de operación altas</b>	35	33	27
<b>Aspectos</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Flujo Paralelo</b>	<b>Contraflujo</b>
<b>Técnicos</b>	<b>100</b>		
<b>Variación de temperatura</b>	<b>100</b>	<b>65</b>	<b>70</b>
<b>Aspectos</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Simple</b>	<b>Múltiples</b>
<b>Técnicos</b>	<b>100</b>	<b>92</b>	<b>73</b>
<b>Menor complejidad de construcción</b>	<b>30</b>	<b>27</b>	<b>23</b>
<b>Intercambiar calor una temperatura constante</b>	<b>70</b>	<b>65</b>	<b>50</b>
<b>Aspectos</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Regenerativo</b>	<b>No-regenerativo</b>
<b>Técnicos</b>	<b>100</b>	<b>92</b>	<b>73</b>
<b>Menor complejidad de construcción</b>	<b>30</b>	<b>27</b>	<b>23</b>
<b>Recirculación constante del fluido</b>	<b>70</b>	<b>65</b>	<b>50</b>

Como se puede observar en la Tabla 2, el intercambiador de calor idóneo para este equipo es un intercambiador de calor de carcasa y tubos, flujo cruzado, paso simple, y regenerativo, teniendo en cuenta la puntuación máxima de cada característica.

#### 5.1.4 Selección de materiales para la cabina de curado

La cabina de curado consta de paredes internas, techo y suelo, estructura interna, aislamiento térmico, y de un recubrimiento Exterior como se puede observar en la Figura 27, se debe tener en consideración los parámetros mencionados en el punto 5.1.1, para realizar una selección de materiales adecuada, en la Tabla 3, se puede observar la selección de los distintos materiales.



*Figura 27 Esquema Cabina de Curado.*

*Fuente: Autores.*

*Tabla 3 Selección de Materiales Cabina de Curado.*

*Fuente: Autores.*

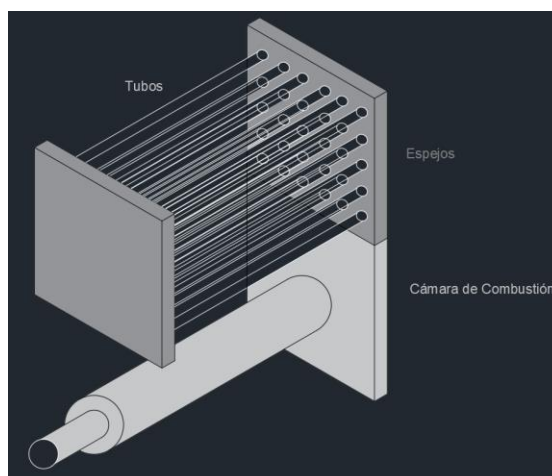
<b>APLICACIÓN</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>Paredes internas</b>	Plancha de Acero Inoxidable AISI 304	Alta resistencia a la corrosión y oxidación, temperatura de operación máxima de 720°C.
<b>Techo y Suelo</b>	Plancha de Acero Inoxidable AISI 304	Alta resistencia a la corrosión y oxidación, temperatura de operación máxima de 720°C.
<b>Estructura Interna</b>	Tubo Estructural ASTM A-500	Acero estructural, buena soldabilidad.

<b>Aislamiento Térmico</b>	Lana de Vidrio	Resistencia a altas temperaturas, Baja Conductividad Térmica, Fácil Aplicación.
<b>Recubrimiento Exterior</b>	Plancha de Acero Galvanizado ASTM A653	Resistencia a la corrosión y oxidación, recubrimiento de zinc, libre de mantenimiento.

No se utiliza planchas de acero galvanizado, en las paredes internas como en el techo y suelo de la cabina de curado. “Los revestimientos galvanizados no muestran ninguna diferencia importante en la tasa de corrosión en temperaturas por debajo de -40°C. En temperaturas más elevadas, el revestimiento puede verse afectado [13].” “En la exposición continua a largo plazo, la temperatura máxima recomendada es de 200°C (392°F). La exposición continua a temperaturas por encima de esta puede causar que la capa exterior de zinc libre se descascare de la capa de aleación zinc/hierro subyacente [13].”

### 5.1.5 Selección de materiales para el intercambiador de calor

El intercambiado de calor está formado por: Tubos, Espejos, y Cámara de Combustión, como se puede observar en la Figura 28. Se debe tener en consideración los parámetros mencionados en el punto 5.1.1 para realizar una selección de materiales adecuada. En la Tabla 4, se puede observar la selección de los distintos materiales.



*Figura 28 Esquema Intercambiador de Calor.*

*Fuente: Autores.*

**Tabla 4** Selección de Materiales Intercambiador de Calor

*Fuente:* Autores.

<b>APLICACIÓN</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>Tubos</b>	Cañería de Acero ISO-65	Buena soldabilidad, Alta conductividad térmica.
<b>Espejos</b>	Plancha de Acero ASTM A36	Acero estructural, buena soldabilidad.
<b>Cámara de Combustión</b>	Plancha de Acero Inoxidable AISI 304	Alta resistencia a la corrosión y oxidación, temperatura de operación máxima de 720°C.

#### **5.1.6 Dimensionamiento de la cabina de curado**

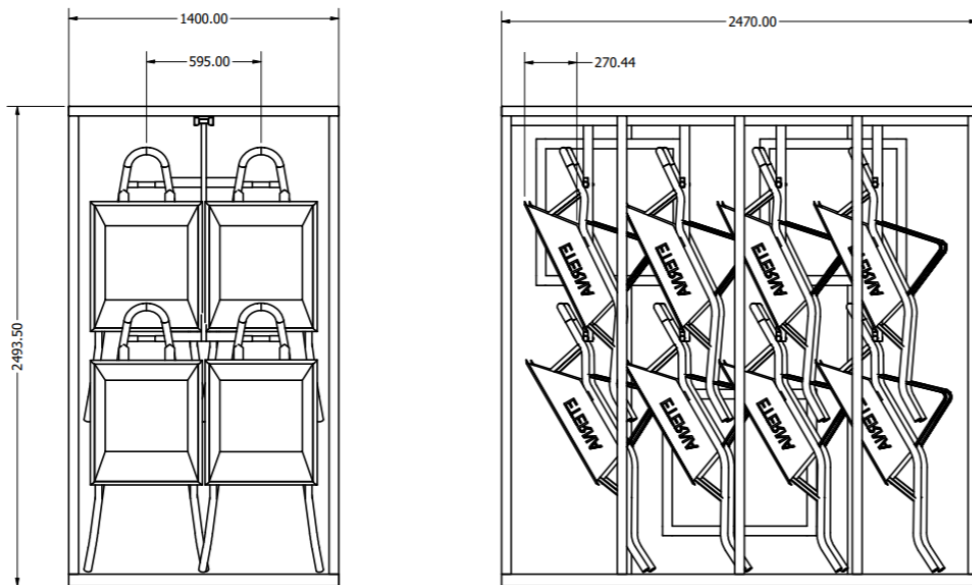
Para la realización del dimensionamiento de la cabina de curado, como punto de partida se debe cumplir con las condiciones de diseño planteadas anteriormente. La cabina de curado interiormente debe soportar una temperatura de trabajo de 210°C, y a su vez las paredes que la conforman deben evitar que se generen pérdidas de calor elevadas hacia el exterior. Para cumplir con este requerimiento de operación, las paredes deben contar de un aislante térmico interno, va a reducir las pérdidas de calor hacia el exterior.

La producción actual es de 128 carretillas, y el espacio que dispone la fábrica para la implementación del horno es de 3 metros cuadrados, entonces se requiere un sistema que realice el menor número de ciclos para evitar desperdiciar energía.

A su vez, se debe asegurar que el operario a cargo del equipo pueda realizar la manipulación con facilidad. En base a todos los puntos mencionados anteriormente se realizó el dimensionamiento de la cabina de curado, como se puede observar en la Figura 30. Para verificar que existe una distribución adecuada de la carga, se debe constatar la exposición de transferencia de calor, para esto se va a utilizar la Figura 31, y la relación C/W, la cual determina la relación de espaciado, R, donde C es la distancia entre centros, y W es el ancho o diámetro de la carga.

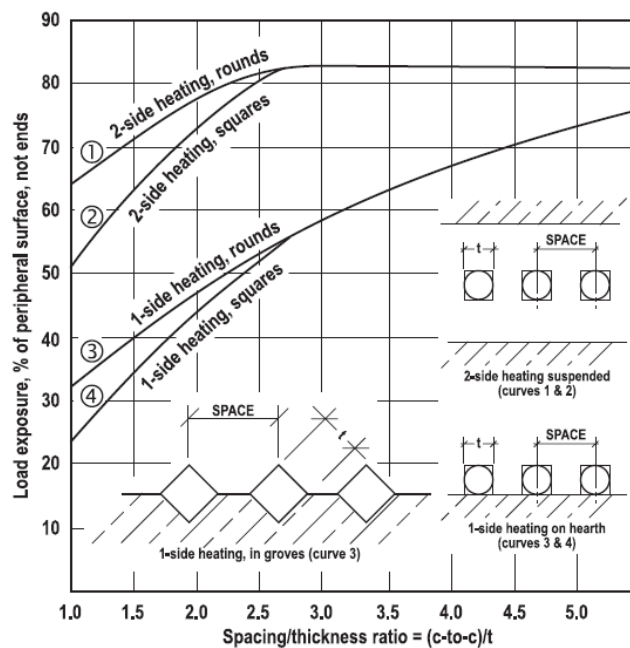


“Para una exposición de transferencia de calor razonable (uniformidad de la temperatura y economía de combustible), una relación de separación mínima,  $C / R = (\text{centro-a-centro}) / W$ , es 1.6. En algún lugar por encima de una relación de separación de 2.0, se genera la pérdida de capacidad del horno (debido a que una separación más amplia permite menos piezas en todo el horno) [8].”



**Figura 29** Dimensionamiento de la cabina de curado.

*Fuente:* Autores.



**Figura 30** % Exposición vs relación de espaciado [8].

Para obtener la exposición de transferencia de calor mencionada anteriormente, se debe dar valores a C y W. Para este caso en particular estos valores son los siguiente:  $C=595\text{mm}$ , y  $W=270.44\text{mm}$ , con estos valores definidos, se realiza la relación explicada anteriormente,  $R=C/W = 595\text{mm}/270.44\text{mm} = 2.2$ . Como se puede observar en la Figura 31, con este valor de R, se obtiene una exposición de transferencia de calor aproximadamente del 78%, y a su vez R al ser un valor  $=2.2$ . Se puede decir que existe una separación óptima en la carga. “A menos que los espacios entre las piezas sean excesivamente grandes o pequeños, la capacidad de calefacción no se ve afectada notablemente porque los puntos desnudos del hogar reciben radiación de los gases, así como del techo y las paredes laterales [8].”

#### **5.1.7 Diseño térmico de la cabina de curado**

Para realizar el diseño térmico de la cabina de curado, se debe tener como punto de partida las condiciones de operación mencionadas anteriormente, como primer paso, se requiere determinar la cantidad de calor requerida por la carga situada al interior de la cabina de curado, como también, la cantidad de calor requerida por las paredes internas, techo y suelo de la cabina de curado. Posteriormente se debe realizar el diseño térmico de las paredes de la cabina de curado, es necesario dimensionar el espesor del aislante térmico tanto en las paredes, techo y suelo de la cabina de curado. A más de esto se requiere conocer las propiedades físicas de los materiales a utilizar mencionados anteriormente en la Tabla 3. A continuación se detallará el diseño analítico y computacional para el desarrollo del presente punto.

A. Calor requerido por la carga dentro de la cabina de curado para el desarrollo de este punto, se debe considerar:

- ✚ El material utilizado para la fabricación de las carretillas es un acero ASTM A-36 (Norma equivalente AISI o SAE 1020).
- ✚ Cómo ya se indicó, dentro de la cabina de curado, se van a introducir un total de 16 carretillas por ciclo.
- ✚ La masa de una sola carretilla es de 32lb o 14.515Kg.
- ✚ La temperatura de operación es de 210°C.
- ✚ La temperatura ambiente promedio, de la ciudad de Cuenca - Ecuador, en las mañanas.

Para obtener la Temperatura ambiente promedio ( $T_{mín}$ ), se tomó como referencia las temperaturas mínimas de la ciudad de Cuenca, durante el transcurso del año. Como se puede observar en la Tabla 5, se obtiene el valor de  $T_{min}=10^{\circ}\text{C}$ , se toma este valor, para el diseño del sistema se debe considerar la temperatura crítica.

*Tabla 5 Temperaturas promedio Cuenca – Ecuador [14].*

*Fuente: Autores.*

MES	Tmax(°C)	Tmin(°C)
<b>Enero</b>	23	11
<b>Febrero</b>	23	12
<b>Marzo</b>	22	12
<b>Abril</b>	22	11
<b>Mayo</b>	22	11
<b>Junio</b>	21	10
<b>Julio</b>	20	10
<b>Agosto</b>	21	9
<b>Septiembre</b>	22	10
<b>Octubre</b>	23	10
<b>Noviembre</b>	23	10
<b>Diciembre</b>	23	11
<b>PROMEDIO</b>	<b>22,083</b>	<b>10,583</b>

Como primer paso se debe obtener las propiedades físicas del material, como se muestra en la Figura 32.

### General Properties

Density	7.8e3	-	7.9e3	kg/m <sup>3</sup>
Price	* 0.56	-	0.61	USD/kg

### Composition overview

#### Composition (summary)

Fe/0.3-0.6Mn/0.17-0.23C/<0.05S/<0.04P

Base Fe (Iron)

### Composition detail (metals, ceramics and glasses)

C (carbon)	0.17	-	0.23	%
Fe (iron)	99.1	-	99.5	%
Mn (manganese)	0.3	-	0.6	%
P (phosphorus)	0	-	0.04	%
S (sulfur)	0	-	0.05	%

### Mechanical properties

Young's modulus	205	-	215	GPa
Flexural modulus	* 205	-	215	GPa
Shear modulus	79	-	84	GPa
Bulk modulus	158	-	175	GPa
Poisson's ratio	0.285	-	0.295	
Shape factor	59			
Yield strength (elastic limit)	310	-	350	MPa
Tensile strength	395	-	490	MPa
Compressive strength	* 310	-	350	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	310	-	350	MPa
Elongation	28	-	43	% strain
Hardness - Vickers	125	-	150	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 223	-	260	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 131	-	183	MPa
<small>Parameters: Stress Ratio = 0, Number of Cycles = 1e7</small>				
Fracture toughness	* 43	-	63	MPa.m <sup>0.5</sup>
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.00101	-	0.00121	

### Thermal properties

Melting point	1.48e3	-	1.52e3	°C
Maximum service temperature	* 340	-	356	°C
Minimum service temperature	* -68	-	-38	°C
Thermal conductivity	50	-	54	W/m.°C
Specific heat capacity	465	-	505	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	11.5	-	12.5	µstrain/°C
Latent heat of fusion	* 270	-	275	kJ/kg

Figura 31 Propiedades Físicas del Acero AISI 1020 [14].

A continuación, se realizan los cálculos analíticos necesarios para determinar el calor requerido por la carga. Como primer paso se debe obtener la carga total, para esto se va a utilizar la Ecuación 1, donde  $m$  es la masa de una sola carretilla, y  $n$  es el número de carretillas que ingresan por ciclo. [9]

$$ct = m * n \quad (1)$$

$$ct = m * n = 14.515Kg * 16 = 232.24Kg$$

Como segundo paso, se debe conocer el valor de la temperatura media de la carga, como también del calor específico del acero utilizado a esta temperatura. Como se puede observar en la Ecuación 2, se requiere los valores  $T_{máx}$  y  $T_{mín}$ , estas temperaturas son: la temperatura de operación, y la temperatura ambiente, respectivamente.

Propiedades de metales sólidos

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(W/m \cdot K)/c_p(J/kg \cdot K)$					
		$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg · K	$k$ W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m <sup>2</sup> /s	100	200	400	600	800	1000
Aceros al carbono:											
Simple al carbono (Mn ≤ 1%, Si ≤ 0.1%)		7 854	434	60.5	17.7			56.7	48.0	39.2	30.0
AISI 1010		7 832	434	63.9	18.8			487	559	685	1 169
								58.7	48.8	39.2	31.3
								487	559	685	1 168
Al carbono-silicio (Mn ≤ 1%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)		7 817	446	51.9	14.9			49.8	44.0	37.4	29.3
								501	582	699	971

Figura 32 Propiedades de metales sólidos [11].

$$T_m = \frac{T_{máx} - T_{mín}}{2} \quad (2)$$

$$T_m = \frac{T_{máx} - T_{mín}}{2} = \frac{210^\circ C - 10^\circ C}{2} = 100^\circ C$$

Con el valor de la temperatura media, se procede a obtener el valor del calor específico del acero, a esta temperatura. Utilizando la Figura 33, se obtiene el valor del calor específico del acero ASTM A-36 un valor de:  $C_p = 472.69 J/Kg \cdot K = 0.47269 KJ/Kg \cdot K$ .

Finalmente, se obtiene el calor requerido por la carga, utilizando la Ecuación 3. [9] [12]

$$Q_1 = ct * C_p * (T_{máx} - T_{mín}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= ct * C_p * (T_{máx} - T_{mín}) \\ &= 232.24 Kg * \frac{0.47269 KJ}{Kg} * K * (483^\circ K - 283^\circ K) \\ &= 21955.505 KJ \end{aligned}$$

B. Calor requerido por las paredes internas, techo y suelo de la cabina de curado.

Para el desarrollo de este punto, se debe considerar:

- ✚ El material utilizado para la fabricación de las paredes internas, techo y suelo, es un Acero Inoxidable AISI 304.
- ✚ La masa total de las paredes.
- ✚ La temperatura de operación es de 210°C.
- ✚ La temperatura ambiente 10°C.

Como primer paso se debe obtener las propiedades físicas del material, como se muestra en la Figura 34. En base al dimensionamiento de la cabina de curado ya realizado, se puede obtener el volumen de las paredes internas, techo y cielo. La suma de estos volúmenes da un valor de 0.0265m<sup>3</sup> con el valor de densidad del acero inoxidable AISI 304 obtenido de la Figura 34. Se puede obtener la masa total de las paredes internas, techo y suelo, como se puede observar a continuación, utilizando la Ecuación 4, donde: (*Vol*) Volumen total, y ( $\rho$ ) Densidad del material. [9]

$$mc = Vol * \rho \quad (4)$$

$$mc = Vol * \rho = 0.0265m^3 * \frac{7850Kg}{m^3} = 208.025Kg$$

Como segundo paso, se debe conocer el valor de la temperatura media de la carga, como también del calor específico del acero utilizado a dicha temperatura. Como se puede observar en la Ecuación 5, se requiere los valores de: T<sub>máx</sub> y T<sub>mín</sub>, estas temperaturas son: la temperatura de operación, y la temperatura ambiente, respectivamente.

### General Properties

Density	7.85e3	-	8.06e3	kg/m <sup>3</sup>
Price	* 3.4	-	3.73	USD/kg

### Composition overview

#### Composition (summary)

Fe/17.5-20Cr/8-11Ni/<2.0Mn/<1.0Si/<0.08C/<0.045P/<0.03S

Base Fe (Iron)

### Composition detail (metals, ceramics and glasses)

C (carbon)	0	-	0.08	%
Cr (chromium)	17.5	-	20	%
Fe (iron)	65.8	-	74.5	%
<u>Mn (manganese)</u>	0	-	2	%
Ni (nickel)	8	-	11	%
P (phosphorus)	0	-	0.045	%
S (sulfur)	0	-	0.03	%
Si (silicon)	0	-	1	%

### Mechanical properties

Young's modulus	190	-	203	GPa
Flexural modulus	* 190	-	203	GPa
Shear modulus	74	-	81	GPa
Bulk modulus	134	-	151	GPa
Poisson's ratio	0.265	-	0.275	
Shape factor	62			
Yield strength (elastic limit)	205	-	310	MPa
Tensile strength	510	-	620	MPa
Compressive strength	* 205	-	310	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	205	-	310	MPa
Elongation	45	-	60	% strain
Hardness - Vickers	170	-	210	HV
Hardness - Rockwell B	75	-	85	
Hardness - Rockwell C	* 0	-	13.4	
Hardness - Brinell	149	-	201	MPa
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	229	-	253	MPa
Fatigue strength model (stress range)	144	-	196	MPa
<small>Parameters: Stress Ratio = 0, Number of Cycles = 1e7</small>				
Fracture toughness	55	-	71	MPa.m <sup>0.5</sup>
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 9.5e-4	-	0.0013	

### Thermal properties

Melting point	1.4e3	-	1.45e3	°C
Maximum service temperature	750	-	925	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	14	-	17	W/m.°C
Specific heat capacity	490	-	530	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	16	-	18	μstrain/°C
Latent heat of fusion	* 260	-	285	kJ/kg

Figura 33 Propiedades Físicas del Acero Inoxidable AISI 304 [14].

$$T_m = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{2} \quad (5)$$

$$T_m = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{210^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}}{2} = 100^{\circ}\text{C}$$

Con el valor de la temperatura media, se procede a obtener el valor del calor específico del acero inoxidable, a esta temperatura.

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(W/m \cdot K)/c_p(J/kg \cdot K)$					
		$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg · K	$k$ W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m <sup>2</sup> /s	100	200	400	600	800	1000
Aceros inoxidables:											
AISI 302		8 055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4
AISI 304	1 670	7 900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	16.6	19.8	22.6	25.4
AISI 316		8 238	468	13.4	3.48	272	402	515	557	582	611
AISI 347		7 978	480	14.2	3.71			504	550	576	602
								15.8	18.9	21.9	24.7
								513	559	585	606

Figura 35 Propiedades de metales sólidos [9].

Utilizando la Figura 35, se obtiene el valor del calor específico del acero inoxidable AISI 304, se obtiene un valor de:  $C_p = 504.74J/Kg \cdot K = 0.50474KJ/Kg \cdot K$ . Finalmente, se obtiene el calor requerido por las paredes, techo, y suelo, utilizando la Ecuación 6.

$$Q2 = mc * Cp * (Tmáx - Tmín) \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 Q2 &= mc * Cp * (Tmáx - Tmín) \\
 &= 208.025Kg * \frac{0.50474KJ}{Kg} * K * (483^\circ K - 283^\circ K) \\
 &= 20999.708KJ
 \end{aligned}$$

C. Calor requerido para calentar al aire dentro de la cabina de curado. Para el desarrollo de este punto, se debe considerar:

- ✚ Temperatura ambiente de 10°C
- ✚ Temperatura de operación de 210°C
- ✚ Volumen interno de la cabina de curado

Como primer paso se debe obtener las propiedades físicas del fluido, utilizando la Figura 36, y en la Figura 37.

Temp. $T, ^\circ C$	Densidad $\rho, kg/m^3$	Calor específico $c_p, J/kg \cdot K$	Conductividad térmica $k, W/m \cdot K$	Difusividad térmica $\alpha, m^2/s$	Viscosidad dinámica $\mu, kg/m \cdot s$	Viscosidad cinemática $\nu, m^2/s$	Número de Prandtl Pr
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268

Figura 36 Propiedades físicas del aire [12].



Altitud, m	Temperatura, °C	Presión, kPa	Gravedad g, m/s <sup>2</sup>	Velocidad del sonido, m/s	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	Viscosidad $\mu$ , kg/m · s	Conductividad térmica, W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	$1.789 \times 10^{-5}$	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	$1.783 \times 10^{-5}$	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	$1.777 \times 10^{-5}$	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	$1.771 \times 10^{-5}$	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	$1.764 \times 10^{-5}$	0.0250
1000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	$1.758 \times 10^{-5}$	0.0249
1200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	$1.752 \times 10^{-5}$	0.0248
1400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	$1.745 \times 10^{-5}$	0.0247
1600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	$1.739 \times 10^{-5}$	0.0245
1800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	$1.732 \times 10^{-5}$	0.0244
2000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	$1.726 \times 10^{-5}$	0.0243
2200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	$1.720 \times 10^{-5}$	0.0242
2400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	$1.713 \times 10^{-5}$	0.0241
2600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	$1.707 \times 10^{-5}$	0.0240
2800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	$1.700 \times 10^{-5}$	0.0239

Figura 37 Propiedades de la atmósfera a gran altitud [12].

Los valores resultantes, son los siguientes: Densidad del aire a la temperatura ambiente de 10°C ( $\rho_1$ ) = 1.246 Kg/m<sup>3</sup>, Calor Específico del aire a la temperatura ambiente de 10°C ( $C_{p1}$ ) = 1.006 KJ/Kg\*°K, Densidad del aire a nivel del mar ( $\rho_2$ ) = 1.225Kg/m<sup>3</sup>, Densidad del aire a 2560m (Altitud de la ciudad de Cuenca - Ecuador) ( $\rho_3$ ) = 0.951 Kg/m<sup>3</sup>.

Previo al cálculo de la masa de aire al interior de la cabina de curado, se debe obtener el valor del factor de corrección por la diferencia de altitudes (G), utilizando la Ecuación 7. [6]

$$G = \frac{\text{densidad al nivel del mar}}{\text{densidad a la altitud actual}} \quad (7)$$

$$G = \frac{\rho_3}{\rho_2} = \frac{0.951}{1.225} = 0.776$$

El volumen interno de la cabina de curado se determina en base a las dimensiones mencionadas anteriormente, se obtiene un volumen ( $V_c$ ) de 8.75m<sup>3</sup> con este valor se procede a calcular la masa total al interior de la cabina de curado ( $m_{tc}$ ), utilizando la Ecuación 8.

$$m_{tc} = V_c * \rho_1 * G \quad (8)$$

$$m_{tc} = 8.75m^3 * \frac{1.246Kg}{m^3} * 0.776 = 8.42Kg$$

Finalmente, se obtiene el calor requerido por el aire al interior de la cabina de curado, utilizando la Ecuación 9. [9]

$$Q3 = mtc * Cp1 * (Tmáx - Tmín) \quad (9)$$

$$Q3 = 8.42\text{Kg} * \frac{1.006\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{K}} * (483^\circ\text{k} - 283^\circ\text{K}) = 1694.104\text{KJ}$$

Con los valores obtenidos previamente, se debe obtener un valor resultante del calor requerido en Watts (W), para esto se requiere del tiempo de calentamiento para la cabina de curado, teniendo en consideración las condiciones de diseño planteadas anteriormente, en el punto 5.1.7. Como se sabe existe una producción semanal de 128 carretillas, y se pretende realizar la aplicación de pintura electrostática y curado, en una jornada laboral de ocho horas, por lo tanto:

Carretillas por ciclo: 16

Número de ciclos necesarios para cubrir la producción semanal:  $128/16=8$

Se define un tiempo de enfriamiento de: 15min, “ya que es necesario refrigerar tanto la carga que se encuentra dentro del horno, así como también el hogar del intercambiador de calor [6].”

Tiempo de un ciclo = Tiempo Calentamiento +Tiempo Curado de 11 minutos [5] + Tiempo de Enfriamiento; para la obtención de este valor, se varió el Tiempo de Calentamiento, hasta que el tiempo necesario para cubrir la producción semanal sea menor o igual a ocho horas, teniendo como resultado un tiempo de calentamiento de 25min.

Tiempo de un ciclo = Tiempo Calentamiento +Tiempo Curado + Tiempo de Enfriamiento = 51min.

Tiempo necesario para cubrir la producción semanal:  $8\text{ciclos} * 51\text{min} = 408\text{min} = 6.8 \text{ horas} = 7 \text{ horas}$ .

Como se puede observar, se cumple la condición mencionada anteriormente, por lo tanto, para la realización de los posteriores cálculos analíticos, se va a tener un Tiempo de Calentamiento (tc) de 25min.

A continuación, se obtendrá el calor total (Qt1), requerido por las paredes de la cabina de curado, la carga, y del aire, en Watts (W).

$$Qt1 = Q1 + Q2 + Q3 = 21955.505KJ + 20999.708KJ + 1694.104KJ$$

$$Qt1 = 44649.317KJ$$

$$tc = 25min = 1500s$$

$$Qt1 = \frac{44649.317KJ}{tc} = 29.766KW$$


### 5.1.8 Pérdida de energía en las paredes de la cabina de curado

En el presente punto, se determinará la cantidad de energía que se pierde por la transferencia de calor, tanto en las paredes laterales, como en el techo y suelo de la cabina de curado. Para la selección del aislante térmico, se realizó una búsqueda de los principales aislantes térmicos, que se encuentran en el mercado nacional. En la Figura 38, se puede observar las opciones de aislantes térmicos, en base al coeficiente de transferencia térmica, se seleccionó el aislante térmico conocido como INSULQUICK, el mismo al estar en contacto a una temperatura de 210°, tiene una conductividad térmica de 0.081W/m°C.

Como se puede observar en la Figura 39, para una temperatura de operación de 210°C, la eficiencia del aislante térmico con un espesor de 2in, es de un 94.34%, con respecto al siguiente espesor de aislante térmico, el cual es de 3in con una eficiencia de 96.15%, existiendo una diferencia del 1.81%, por lo tanto, se puede decir que el aislante térmico de 2in, es el adecuado, al existir un porcentaje de diferencia tan pequeño, que al seleccionar un espesor mayor al de 2in, se estaría sobredimensionando, el espesor de la pared aislante. En la Figura 40, se puede observar el dimensionamiento de las paredes de la cabina de curado.

TEMPERATURA		CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	
°F	°C	BTU.in/hr.ft².°F	W/m.°C
25	-3.89	0.21	0.030
<b>75</b>	<b>23.89</b>	<b>0.25</b>	<b>0.036</b>
100	37.78	0.27	0.039
200	93.33	0.35	0.050
300	148.89	0.44	0.063
400	204.44	0.55	0.079
500	260.0	0.7	0.101

**INSULQUICK**



TEMPERATURA		CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	
°F	°C	BTU.in/hr.ft².°F	W/m.°C
25	-3.9	0.30	0.043
<b>75</b>	<b>23.9</b>	<b>0.31</b>	<b>0.045</b>
100	37.8	0.33	0.048
200	93.3	0.44	0.063
300	148.9	0.60	0.087
400	204.4	0.89	0.128
500	260.0	1.10	0.159
600	315.6	1.50	0.216

**Lana AW**



Figura 38 Aislantes Térmicos [15].

DESEMPEÑO TÉRMICO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE SERVICIO (1)							
TEMPERATURA DE SERVICIO		ESPESOR DE AISLAMIENTO					
		1,5 in	2 in	3 in	4 in	6 in	8 in
250 °F	ST (°F)	94,6	90,4	85,7	83,2	80,7	79,3
	HL (Btu/hr/ft <sup>2</sup> )	33,39	25,60	17,46	13,25	8,95	6,75
	EFF (%)	92,03	93,89	95,83	96,84	97,87	98,39
400 °F	ST (°F)	116,4	107,7	98,2	93,0	87,4	84,5
	HL (Btu/hr/ft <sup>2</sup> )	76,66	58,69	39,98	30,32	20,45	15,43
	EFF (%)	92,45	94,22	96,06	97,01	97,99	98,48
550 °F	ST (°F)	143,4	129,5	114,0	105,5	96,4	91,5
	HL (Btu/hr/ft <sup>2</sup> )	137,50	105,20	71,57	54,26	36,58	27,59
	EFF (%)	92,73	94,44	96,22	97,13	98,07	98,54
700 °F	ST (°F)	175,6	155,8	133,5	121,1	107,6	
	HL (Btu/hr/ft <sup>2</sup> )	219,90	168,00	114,20	86,58	58,34	
	EFF (%)	93,00	94,65	96,36	97,24	98,14	
850 °F	ST (°F)	212,7	186,5	156,6	139,7	121,2	
	HL (Btu/hr/ft <sup>2</sup> )	327,50	250,20	170,00	128,80	86,75	
	EFF (%)	93,27	94,86	96,51	97,35	98,22	

ST=Temperatura de la superficie; HL=Pérdidas de calor por hora; EFF=Eficiencia de aislamiento.  
 (1)3EPlus V4.1 Software (NAIMA) - Calculations of this computer program are based on tested conductivity values and conditions of Horizontal heat flow, Tank Shell-Horizontal, base metal steel, 75°F ambient temperature and wind speed 5 mph, ASJ jacket, as per ASTM C680. Meets ASTM C585 Rigid and ASTM C612 Type II.

Figura 39 Desempeño Térmico del Aislante [15].

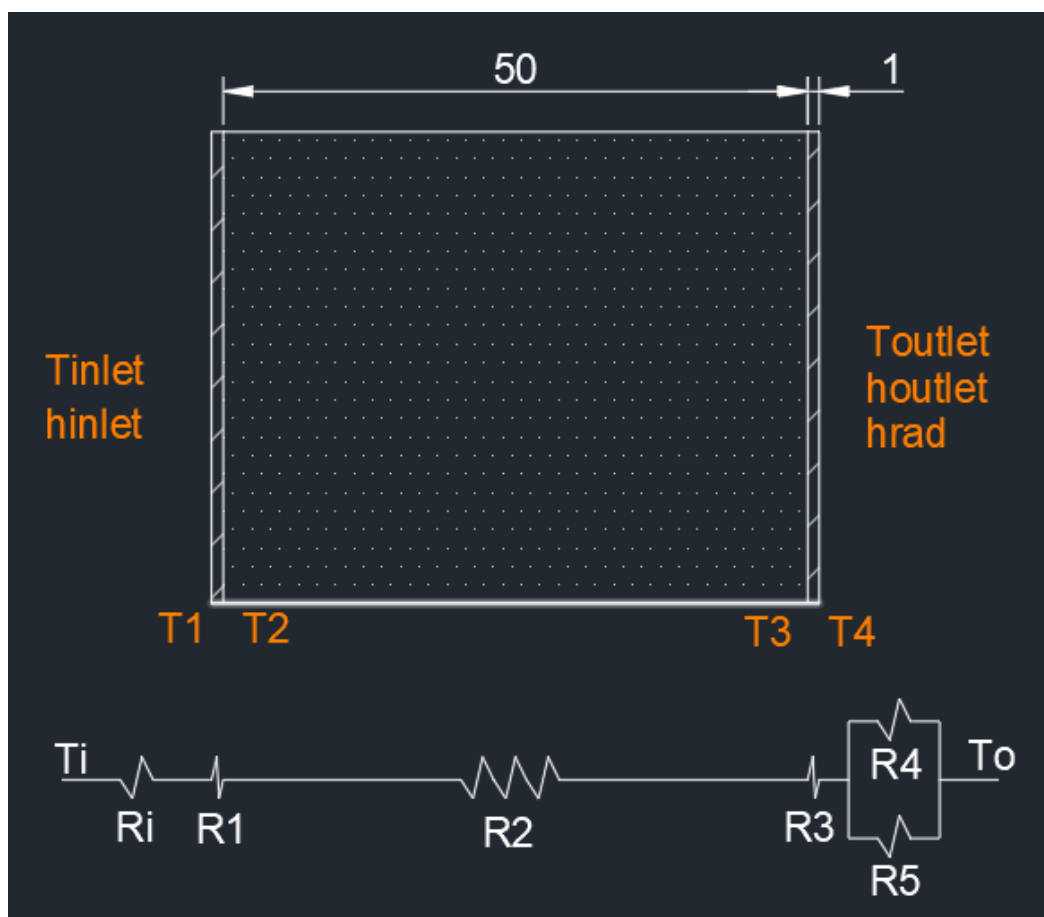


Figura 40 Dimensionamiento de las paredes.

Fuente: Autores.

Para determinar la cantidad de energía que se genera por la transferencia de calor en las paredes, es necesario determinar el coeficiente de transferencia por convección al interior de la cabina de curado (hinlet), el coeficiente de transferencia por convección al exterior de la cabina de curado (houtlet), el coeficiente de radiación al exterior de la cabina de curado (hrad), una vez obtenidos estos valores, se puede resolver el sistema de resistencia, el cual se puede observar en la Figura 40.

A continuación, se determinará el coeficiente de transferencia por convección al interior de la cabina de curado (hinlet), utilizando la teoría de la convección forzada por flujo interno. Para la determinación de este coeficiente es necesario determinar la velocidad del fluido al interior de la cámara de curado (vf) [8], recomienda una velocidad de  $0.75\text{ft/s} = 0.229\text{m/s}$ , para hornos que operan a temperatura por debajo de los  $1100^\circ\text{F} = 593.33^\circ\text{C}$ , y con un flujo turbulento, por lo tanto, para utilizar este valor, se deber comprobar que el flujo dentro de la cabina de curado, sea un flujo turbulento, Utilizando la Ecuación 10, se procederá a determinar el número de Reynolds, con el cual se puede determinar si existe o no un flujo turbulento. Donde: ( $\mu_a$ ) Viscosidad dinámica del aire  $210^\circ\text{C}$ , ( $\rho_a$ ) Densidad del aire  $210^\circ\text{C}$ , (vf) Velocidad del fluido, ( $A_{t1}$ ) Área transversal del flujo, ( $P_{m1}$ ) Perímetro mojado, ( $D_{h1}$ ) Diámetro hidráulico. Las propiedades físicas del aire se obtienen de la Figura 41. [12]

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p$ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad témica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad témica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935

Figura 41 Propiedades físicas del aire [12].

$$Re = \frac{\rho a * vt * Dh1}{\mu a} \quad (10)$$

$$Dh1 = \frac{4 * At1}{Pm1} = \frac{4 * 6.25\text{m}^2}{10\text{m}} = 2.5\text{m}$$

$$Re = \frac{\rho a * vt * Dh1}{\mu a} = \frac{0.7316\text{Kg/m}^3 * 0.229\text{m/s} * 2.5\text{m}}{2.614 \times 10^{-5}\text{Kg/ms}} = 16022.992$$

Como se puede observar el número de Reynolds es mayor a 2100, por lo tanto, existe un flujo turbulento. Ahora se debe obtener en número de Nusselt, para posteriormente obtener el valor del coeficiente de transferencia por convección al interior de la cabina de curado (hinlet). El número de Nusselt, se encuentra definido por la Ecuación 11, donde: (Pr1) Número de Prandtl 210°C, (n) coeficiente n, para casos de calentamiento n=0.4. [9]

$$Nu1 = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^n \quad (11)$$

$$Nu1 = 0.023 * 16022.992^{0.8} * 0.6968^{0.4} = 46.001$$

Una vez obtenido el número de Nusselt, se procede a calcular el coeficiente de transferencia por convección al interior de la cabina de curado (hinlet), el cual está dado por la Ecuación 12, donde: (Ka) Conductividad térmica del aire 210°C. [9]

$$hinlet = \frac{Ka * Nu1}{Dh1} \quad (12)$$

$$hinlet = \frac{0.0384W/mK * 46.001}{2.5m} = 0.707W/m^2K$$

Una vez obtenido el valor del coeficiente de transferencia por convección al interior de la cabina de curado (hinlet), se determinará la temperatura del aire en su interior, con este valor se puede determinar si es necesario, o no, que el aire tenga una temperatura mayor a la de la carga al interior de la cabina de curado. Para obtener este valor, previamente se debe calcular el Número de Biot, si este valor es menor a uno, existirá una buena precisión que se obtengan posteriormente. El Número de Biot, se obtiene en base a la Ecuación 13, donde: (Lc) Longitud característica, se obtiene al dividir el volumen total de la carretilla entre su área superficial total, (Kca) Conductividad térmica del ASTM A-36 210°C, las propiedades físicas del ASTM A-36 se obtienen de la Figura 33.

$$Bi = \frac{hinlet * Lc}{Kca} \quad (13)$$

$$Bi = \frac{0.707W/m^2K * 0.00124m}{54.59W/mK} = 0.0000161$$

Como se puede observar el número de Biot es  $<1$ , por lo tanto, se puede decir que los valores, tienen una precisión adecuada, para realizar el cálculo de la temperatura del aire al interior de la cabina de curado ( $T_{ac}$ ), para obtener este valor se utilizara la Ecuación 14, definida por caso de conducción de calor en régimen estacionario, donde: ( $t_c$ ) Tiempo de calentamiento, ( $h_{inlet}$ ) Coeficiente de convección al interior de la cabina de curado, ( $A_{ca}$ ) Área superficial carretilla, ( $V_{ca}$ ) Volumen total carretilla, ( $T_{max}$ ) Temperatura de operación, ( $T_{min}$ ) Temperatura ambiente, ( $C_{pac}$ ) Calor específico acero ASTM-A36 a  $18^{\circ}\text{C}$ , ( $\rho_{ac}$ ) Densidad acero ASTM-A36, las propiedades del acero ASTM-A36, se obtienen de la Figura 32, y Figura 33, el resto de valores se definieron anteriormente. [9]

$$\frac{T_{min} - T_{ac}}{T_{max} - T_{ac}} = e^{-b \cdot t_c} = e^{-\left(\frac{h_{inlet} \cdot A_{ca} \cdot t_c}{\rho_{ac} \cdot V_{ca} \cdot C_{pac}}\right)} \quad (14)$$

$$T_{ac} = \frac{210^{\circ}\text{C} * e^{-\left(\frac{\frac{0.707\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * 2.387\text{m}^2 * t_c}{\frac{7832\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.00192\text{m}^3 * \frac{347.966}{\text{KgK}}}\right)} - 10^{\circ}\text{C}}{1 - e^{-\left(\frac{0.707\text{W}/\text{m}^2\text{K} * 2.387\text{m}^2 * t_c}{7832\text{Kg}/\text{m}^3 * 0.00192\text{m}^3 * 347.966\text{J}/\text{KgK}}\right)}}$$

$$t_c = 25\text{min}; T_{ac} = 311.468^{\circ}\text{C}$$

Como se puede observar, con un tiempo de calentamiento de 25min, el aire dentro de la cabina de curado tendría una temperatura de  $311.468^{\circ}\text{C}$ , por lo tanto, se volvió a recalcular  $T_{ac}$  realizando los cambios necesarios y obteniendo una temperatura de  $210^{\circ}\text{C}$  con un tiempo de calentamiento de 17min, con este valor, se recalcula  $Q_{t1}$  utilizando el tiempo de calentamiento mencionado anteriormente.

$$Q_{t1} = \frac{44649.317\text{KJ}}{1020\text{s}} = 43.774\text{KW}$$

A continuación, se procederá a obtener el valor del coeficiente de transferencia por convección al exterior de la cabina de curado ( $h_{outlet}$ ), Para esto, es necesario obtener el Número de Raleigh como se muestra en la Ecuación 15, donde: ( $g$ ) gravedad, ( $\beta_a$ ) Coeficiente de expansión volumétrica del aire, ( $T_s$ ) Temperatura superficial, ( $T_{min}$ ) Temperatura ambiente, ( $L_c$ ) Longitud característica para una placa vertical, ( $\nu_a$ ) Viscosidad cinemática del aire, ( $Pr$ ) Número de Prandtl, ( $K_a$ ) conductividad térmica del aire, el número de Nusselt como se muestra en la

Ecuación 16 y finalmente obtener el valor del coeficiente de transferencia por convección al exterior de la cabina de curado (houtlet), utilizando la Ecuación 17, las propiedades físicas del aire, a una temperatura Tmin, se obtienen de la Figura 36, el valor de Ts, se obtiene de la Figura 39, teniendo como valor de partida la temperatura de operación. [9]

$$Ra = \frac{g * \beta a * (Ts - Tmin)Lc^3}{\nu a^2} \quad (15)$$

$$Ra = \frac{\frac{9.81m}{s^2} * \left(\frac{1}{10^\circ C}\right) * (42.863^\circ C - 10^\circ C) * (2.5m)^3}{(1.426 \times 10^{-5})^2} = 2.477 \times 10^{12}$$

$$Nu = 0.1 * Ra^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

$$Nu = 0.1 * (2.477 \times 10^{12})^{\frac{1}{3}} = 1353.034$$

$$houtlet = \frac{Ka * Nu}{Lc} \quad (17)$$

$$houtlet = \frac{0.02439W/mK * 1353.034}{2.5m} = 13.2W/m^2K$$

Una vez determinados los valores de hinlet, y houtlet, se puede determinar el coeficiente de radiación al exterior de cabina de curado (hr), utilizando la Ecuación 18, donde: ( $\sigma$ ) Constante de Stefan-Boltzman, ( $\epsilon$ ) Emisividad del acero, este valor se lo obtiene de la Figura 42, (Ts) Temperatura superficial, (Tmin) Temperatura ambiente. [9]



Material	Temperatura, K	Emisividad, $\epsilon$	Material	Temperatura, K	Emisividad, $\epsilon$
Aluminio			Magnesio pulido	300-500	0.07-0.13
Pulido	300-900	0.04-0.06	Mercurio	300-400	0.09-0.12
Lámina comercial	400	0.09	Molibdeno		
Intensamente oxidado	400-800	0.20-0.33	Pulido	300-2 000	0.05-0.21
Anodizado	300	0.8	Oxidado	600-800	0.80-0.82
Bismuto brillante	350	0.34	Níquel		
Latón			Pulido	500-1 200	0.07-0.17
Intensamente pulido	500-650	0.03-0.04	Oxidado	450-1 000	0.37-0.57
Pulido	350	0.09	Platino pulido	500-1 500	0.06-0.18
Placa mate	300-600	0.22	Plata pulida	300-1 000	0.02-0.07
Oxidado	450-800	0.6	Acero inoxidable		
Cromo pulido	300-1 400	0.08-0.40	Pulido	300-1 000	0.17-0.30
Cobre			Ligeramente oxidado	600-1 000	0.30-0.40
Intensamente pulido	300	0.02	Intensamente oxidado	600-1 000	0.70-0.80
Pulido	300-500	0.04-0.05	Acero		
Lámina comercial	300	0.15	Lámina pulida	300-500	0.08-0.14
Oxidado	600-1 000	0.5-0.8	Lámina comercial	500-1 200	0.20-0.32
Oxidado en negro	300	0.78	Intensamente oxidado	300	0.81
Oro			Estaño pulido	300	0.05
Intensamente pulido	300-1 000	0.03-0.06	Tungsteno		
Hoja brillante	300	0.07	Pulido	300-2 500	0.03-0.29
Hierro			Filamento	3500	0.39
Intensamente pulido	300-500	0.05-0.07	Zinc		
Hierro fundido	300	0.44	Pulido	300-800	0.02-0.05
Hierro forjado	300-500	0.28	Oxidado	300	0.25
Aherrumbrado	300	0.61			
Oxidado	500-900	0.64-0.78			
Plomo					
Pulido	300-500	0.06-0.08			
No oxidado, áspero	300	0.43			
Oxidado	300	0.63			

Figura 42 Emisividad distintos materiales [9].

$$hr = \sigma * \epsilon * \frac{Ts^4 - Tmin^4}{Ts - Tmin} \quad (18)$$

$$hr = 5.7 \times 10^{-8} W/m^2 K^4 * 0.26 * \frac{(42.863^\circ C)^4 - (10^\circ C)^4}{42.863^\circ C - 10^\circ C}$$

$$hr = 0.00152 W/m^2 K$$

Finalmente se realizará el desarrollo del sistema de resistencias presentado inicialmente en la Figura 40, para obtener la pérdida de energía en las paredes de la cabina de curado. Para esto se debe obtener los valores de: (Ri) resistencia por convección forzada al interior de la cabina de curado, (R1) resistencia por conducción pared interna, (R2) resistencia por conducción aislante, (R3) resistencia por conducción pared externa, (R4) resistencia por convección natural al exterior de la cabina de curado, y finalmente (R5) resistencia por radiación al exterior de la cabina de curado.

(Ri) resistencia por convección forzada al interior de la cabina de curado. Para el cálculo de R1, se utiliza la Ecuación 19, donde: (Ap) Área total de las paredes laterales, techo y suelo de la cabina de curado, (hinlet) coeficiente de transferencia por convección al interior de la cabina de curado. [9]

$$Ri = \frac{1}{hinlet * Ap} \quad (19)$$

$$Ri = \frac{1}{0.707W/m^2K * 26.5m^2} = 0.0534K/W$$

(R1) resistencia por conducción pared interna (Paredes laterales, techo, y suelo). Para el cálculo de R1, se utiliza la Ecuación 20, donde: (L1) Espesor de la pared, (Ap) Área total de las paredes laterales, techo y suelo de la cabina de curado, (Kinox) Conductividad térmica del acero inoxidable a Tmax, Las propiedades físicas del acero inoxidable, se obtienen de la Figura 34, y Figura 35. [9]

$$R1 = \frac{L1}{Kinox * Ap} \quad (20)$$

$$R1 = \frac{0.001m}{17.928W/mK * 26.5m^2} = 2.105 \times 10^{-5} K/W$$

(R2) Resistencia por conducción aislante. Para el cálculo de R1, se utiliza la Ecuación 21, donde: (L2) espesor de la pared aislante, (Ap) área total de las paredes aislantes laterales, techo y suelo de la cabina de curado, (Kais) conductividad térmica del aislante, Las propiedades físicas del aislante, se obtienen de la Figura 38, y Figura 39. [9]

$$R2 = \frac{L2}{Kais * Ap} \quad (21)$$

$$R2 = \frac{0.05m}{0.081W/mK * 26.5m^2} = 0.023K/W$$

(R3) resistencia por conducción pared externa (Paredes laterales, techo, y suelo). Para el cálculo de R3, se utiliza la Ecuación 22, donde: (L3) espesor de la pared, (Ap) área total de las paredes laterales, techo y suelo de la cabina de curado, (Kgal) Conductividad térmica del acero galvanizado, Las propiedades físicas del acero galvanizado, se obtienen de la Figura 43. [9]

## General Properties

Density	7.8e3	-	7.9e3	kg/m <sup>3</sup>
Price	* 0.64	-	0.71	USD/kg

## Composition overview

### Composition (summary)

Base: Fe/<1.7Mn/0.1C/<0.25Si/<0.05P/<0.05S

Coating: Zn

Base	Fe (Iron)
------	-----------

### Composition detail (metals, ceramics and glasses)

C (carbon)	0	-	0.241	%
Fe (iron)	93.2	-	96	%
Mn (manganese)	0	-	1.25	%
P (phosphorus)	0	-	0.0483	%
Si (silicon)	0	-	0.241	%
Zn (zinc)	4	-	5	%

## Mechanical properties

Young's modulus	200	-	215	GPa
Compressive modulus	* 200	-	215	GPa
Flexural modulus	200	-	215	GPa
Shear modulus	79	-	84	GPa
Bulk modulus	158	-	175	GPa
Poisson's ratio	0.285	-	0.295	
Shape factor	59.7			
Yield strength (elastic limit)	250	-	395	MPa
Tensile strength	420	-	600	MPa
Compressive strength	* 250	-	395	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 250	-	395	MPa
Elongation	26	-	47	% strain
Hardness - Vickers	108	-	173	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	203	-	293	MPa
Fatigue strength model (stress range)	122	-	215	MPa
<a href="#">Parameters</a> : Stress Ratio = 0, Number of Cycles = 1e7				
Fracture toughness	* 41	-	82	MPa.m <sup>0.5</sup>
Mechanical loss coefficient (tan delta)	8.9e-4	-	0.0014	

## Thermal properties

Melting point	1.48e3	-	1.53e3	°C
Maximum service temperature	* 150	-	180	°C
Minimum service temperature	-68.2	-	-43.2	°C
Thermal conductivity	* 50	-	54	W/m.°C
Specific heat capacity	460	-	505	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	11.5	-	13	µstrain/°C
Latent heat of fusion	* 389	-	471	kJ/kg

Figura 43 Propiedades físicas acero galvanizado ASTM A653 [16].

$$R3 = \frac{L3}{Kgal * Ap} \quad (22)$$

$$R3 = \frac{0.001m}{52W/mK * 26.5m^2} = 7.257 \times 10^{-7} K/W$$

(R4) Resistencia por convección natural al exterior de la cabina de curado. Para el cálculo de R4, se utiliza la Ecuación 23, donde: (Ap) Área total de las paredes laterales, techo y suelo de la cabina de curado, (houtlet) Coeficiente de transferencia por convección al exterior de la cabina de curado. [9]

$$R4 = \frac{1}{houtlet * Ap} \quad (23)$$

$$R4 = \frac{1}{13.2W/m^2K * 26.5m^2} = 2.859x10^{-3}K/W$$

(R5) Resistencia por radiación al exterior de la cabina de curado. Para el cálculo de R5, se utiliza la Ecuación 24, donde: (Ap) Área total de las paredes laterales, techo y suelo de la cabina de curado, (hr) Coeficiente de transferencia por radiación al exterior de la cabina de curado. [9]

$$R5 = \frac{1}{hr * Ap} \quad (24)$$

$$R5 = \frac{1}{0.00152W/m^2K * 26.5m^2} = 24.826K/W$$

A continuación, se va a determinar una resistencia equivalente entre R4 y R5, para posteriormente realizar la suma de las resistencias (Rt), y obtener la pérdida de energía en las paredes de la cabina de curado (Qt2), se utiliza la Ecuación 25. [9]

$$Re = \frac{1}{\frac{1}{R4} + \frac{1}{R5}} \quad (25)$$

$$Re = \frac{1}{\frac{1}{2.859x10^{-3}K/W} + \frac{1}{24.826K/W}} = 2.859x10^{-3}K/W$$

$$Rt = Ri + R1 + R2 + R3 + Re$$

$$Rt = (0.0534 + 2.105x10^{-5} + 0.023 + 7.257x10^{-7} + 2.859x10^{-3})K/W$$

$$Rt = 0.0793K/W$$

Es necesario, obtener el coeficiente global de transferencia de calor, ya que, este relaciona todas las resistencias térmicas del sistema, y al área de transferencia de calor total, para esto se utiliza la Ecuación 26. [9]

$$U = \frac{1}{Rt * Ap} \quad (26)$$

$$U = \frac{1}{0.0793K/W * 26.5m^2} = 0.476W/m^2K$$

Utilizando la Ecuación 27, se obtiene la pérdida de energía en las paredes de la cabina de curado (Qt2). [9]

$$Qt2 = \frac{U * Ap * (Tmax - Tmin)}{1000} \quad (27)$$

$$Qt2 = \frac{0.476W/m^2K * 26.5m^2 * (483K - 283K)}{1000}$$

$$Qt2 = 2.523KW$$

Con los valores de: (Tmin) Temperatura ambiente, (R4) Resistencia convección natural al exterior, y (Qt2) Pérdida de energía en las paredes de la cabina de curado, se puede obtener la temperatura en la superficie (T4) de la pared externa de la cabina de curado, para esto se va a utilizar la Ecuación 28, previamente se debe obtener el valor de la razón de transferencia de calor estacionaria (Qte), utilizando la Ecuación 29. [9]

$$T4 = Qte * R4 + Tmin \quad (28)$$

$$Qte = \frac{Tmax - Tmin}{Rt} \quad (29)$$

$$Qte = \frac{483^{\circ}K - 283^{\circ}K}{0.0793K/W} = 2522.068W$$

$$T4 = 2522.068W * 2.859 \times 10^{-3}K/W + 283^{\circ}K$$

$$T4 = 290.211^{\circ}K = 17.211^{\circ}C$$

Como se puede observar, al tener una temperatura superficial de 17.211°C, en la pared exterior de la cabina de curado, con respecto a la temperatura ambiente de 10°C, existe una diferencia de 7.211°C, por esta razón se decidió recalculer T4, utilizando una pared aislante, de 3in de espesor, para de esta forma analizar si es conveniente aumentar el espesor de la pared, o mantener el espesor actual. Realizando los cambios necesarios, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$R2 = \frac{0.0762m}{0.081W/mK * 26.5m^2} = 0.0355K/W$$

$$Rt = (0.0534 + 2.105 \times 10^{-5} + 0.0355 + 7.257 \times 10^{-7} + 2.859 \times 10^{-3})K/W$$

$$Rt = 0.0918K/W$$

$$Qte = \frac{483^{\circ}K - 283^{\circ}K}{0.0918K/W} = 2178.649W$$

$$T4 = 2178.649W * 2.859 \times 10^{-3}K/W + 283^{\circ}K$$

$$T4 = 289.229^{\circ}K = 16.229^{\circ}C$$

Al comparar las temperaturas T4=17.211, y T4=16.229°C, obtenidas con un aislante de 2in y 3in de espesor respectivamente, existe una diferencia de 0.982°C, por lo tanto, se va a mantener el aislante térmico de 2in de espesor, ya que la diferencia de temperaturas es mínima.

Finalmente, se puede obtener la potencia total requerida por la cabina de curado (Qtotal), realizando la suma de la pérdida de energía en las paredes de la cabina de curado (Qt2), con el calor total requerido por las paredes de la cabina de curado, la carga, y del aire (Qt1), como se muestra en la Ecuación 30. [9]

$$Qtotal = Qt1 + Qt2 \tag{30}$$

$$Qtotal = 43.774KW + 2.523KW$$

$$\underline{Qtotal = 46.297KW}$$

### 5.1.9 Selección del combustible

Para la selección del combustible adecuado, se debe tener en cuenta que los quemadores industriales existentes en el mercado trabajan con dos tipos de combustible, Diesel o GLP (Gas Licuado de Petróleo butano y propano), por lo tanto, se realiza la selección entre estos dos combustibles.

Se debe tener en consideración, si las emisiones generadas para obtener la potencia total requerida por el sistema son admisibles por los valores especificados por la “NORMA DE EMISIONES AL AIRE DESDE FUENTES FIJAS DE COMBUSTION [17]”. Dentro del LIBRO VI ANEXO 3 del documento mencionado anteriormente, en el literal 4.1.1.4, menciona lo siguiente:

“4.1.1.4 Serán designadas como fuentes fijas no significativas todas aquellas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos, gaseosos, o cualquiera de sus combinaciones, y cuya potencia calorífica (heat input) sea menor a tres millones de vatios ( $3 \times 10^6$  W), o, diez millones de unidades térmicas británicas por hora ( $10 \times 10^6$  BTU/h). Estas fuentes fijas de combustión no estarán obligadas a efectuar mediciones de sus emisiones actuales, y deberán proceder según se indica en el siguiente artículo. [17]”

Como se puede observar la potencia total requerida por la cabina de curado ( $Q_{total}$ ), tiene un valor de  $46.297 \text{ KW} = 46297 \text{ W}$ , el cual es menor a  $3 \times 10^6$  W, por lo tanto, el presente sistema está dentro de las fuentes fijas no significativas, por lo tanto, las emisiones emitidas no generan un riesgo para el entorno de trabajo y al medio ambiente.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se seleccionó como combustible de trabajo el GLP, aunque el Diesel como combustible, tiene un mayor poder calorífico de 137.380 Btu/gal, a comparación con el Butano con 103.220 Btu/gal, y al Propano con 91.420 Btu/gal, como se observa en la Figura 43. El GLP como combustible tiene una eficiencia del 98% con respecto al 88% del Diesel como se puede observar en la Figura 44, y Figura 45, a más de esto, tiene una mayor reducción del %CO<sub>2</sub>, como se puede observar en la Figura 44, y Figura 45. Por estos valores el GLP es una mejor opción, tiene una mayor eficiencia, y un porcentaje menor de emisiones de CO<sub>2</sub>, lo cual genera una menor contaminación al medioambiente.

Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels

Fuels	Lower Heating Value (LHV) [1]			Higher Heating Value (HHV) [1]			Density
	Btu/ft <sup>3</sup> [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	Btu/ft <sup>3</sup> [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	
<b>Gaseous Fuels @ 32 F and 1 atm</b>							
Natural gas	983	20,267	47,141	1089	22,453	52,225	22,0
Hydrogen	290	51,682	120,21	343	61,127	142,18	2,55
Still gas (in refineries)	1458	20,163	46,898	1,584	21,905	50,951	32,8
<b>Liquid Fuels</b>							
Crude oil	129,670	18,352	42,686	138,350	19,580	45,543	3,205
Conventional gasoline	116,090	18,679	43,448	124,340	20,007	46,536	2,819
Reformulated or low-sulfur gasoline	113,602	18,211	42,358	121,848	19,533	45,433	2,830
CA reformulated gasoline	113,927	18,272	42,500	122,174	19,595	45,577	2,828
U.S. conventional diesel	128,450	18,397	42,791	137,380	19,676	45,766	3,167
Low-sulfur diesel	129,488	18,320	42,612	138,490	19,594	45,575	3,206
Petroleum naphtha	116,920	19,320	44,938	125,080	20,669	48,075	2,745
NG-based FT naphtha	111,520	19,081	44,383	119,740	20,488	47,654	2,651
Residual oil	140,353	16,968	39,466	150,110	18,147	42,210	3,752
Methanol	57,250	8,639	20,094	65,200	9,838	22,884	3,006
Ethanol	76,330	11,587	26,952	84,530	12,832	29,847	2,988
Butanol	99,837	14,775	34,366	108,458	16,051	37,334	3,065
Acetone	83,127	12,721	29,589	89,511	13,698	31,862	2,964
E-Diesel Additives	116,090	18,679	43,448	124,340	20,007	46,536	2,819
Liquefied petroleum gas (LPG)	84,950	20,038	46,607	91,410	21,561	50,152	1,923
Liquefied natural gas (LNG)	74,720	20,908	48,632	84,820	23,734	55,206	1,621
Dimethyl ether (DME)	68,930	12,417	28,882	75,610	13,620	31,681	2,518
Dimethoxy methane (DMM)	72,200	10,061	23,402	79,197	11,036	25,670	3,255
Methyl ester (biodiesel, BD)	119,550	16,134	37,528	127,960	17,269	40,168	3,361
Fischer-Tropsch diesel (FTD)	123,670	18,593	43,247	130,030	19,549	45,471	3,017
Renewable Diesel I (SuperCetane)	117,059	18,729	43,563	125,294	20,047	46,628	2,835
Renewable Diesel II (UOP-HDO)	122,887	18,908	43,979	130,817	20,128	46,817	2,948
Renewable Gasoline	115,983	18,590	43,239	124,230	19,911	46,314	2,830
Liquid Hydrogen	30,500	51,621	120,07	36,020	60,964	141,80	2,68
Methyl tertiary butyl ether (MTBE)	93,540	15,094	35,108	101,130	16,319	37,957	2,811
Ethyl tertiary butyl ether (ETBE)	96,720	15,613	36,315	104,530	16,873	39,247	2,810
Tertiary amyl methyl ether (TAME)	100,480	15,646	36,392	108,570	16,906	39,322	2,913
Butane	94,970	19,466	45,277	103,220	21,157	49,210	2,213
Isobutane	90,060	19,287	44,862	98,560	21,108	49,096	2,118
Isobutylene	95,720	19,271	44,824	103,010	20,739	48,238	2,253
Propane	84,250	19,904	46,296	91,420	21,597	50,235	1,920
<b>Solid Fuels</b>							
Coal (wet basis) [6]	19,546,300	9,773	22,732	20,608,570	10,304	23,968	
Bituminous coal (wet basis) [7]	22,460,600	11,230	26,122	23,445,900	11,723	27,267	
Coking coal (wet basis)	24,600,497	12,300	28,610	25,679,670	12,840	29,865	
Farmed trees (dry basis)	16,811,000	8,406	19,551	17,703,170	8,852	20,589	
Herbaceous biomass (dry basis)	14,797,555	7,399	17,209	15,582,870	7,791	18,123	
Corn stover (dry basis)	14,075,990	7,038	16,370	14,974,460	7,487	17,415	
Forest residue (dry basis)	13,243,490	6,622	15,402	14,164,160	7,082	16,473	
Sugar cane bagasse	12,947,318	6,474	15,058	14,062,678	7,031	16,355	
Petroleum coke	25,370,000	12,685	29,505	26,920,000	13,460	31,308	

Figura 44 Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels [18].

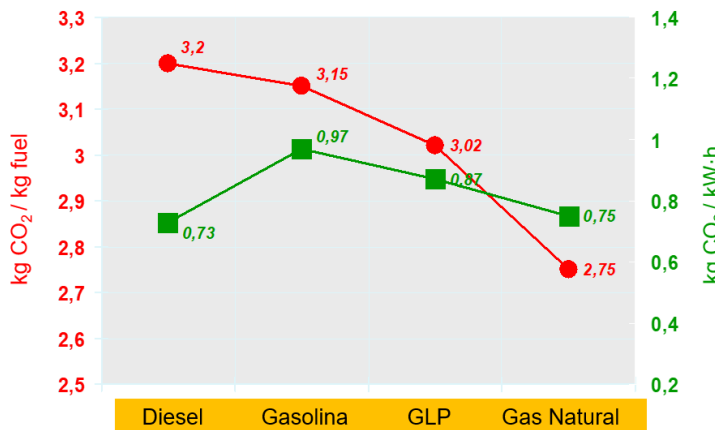


Figura 45 Emisión específica de CO<sub>2</sub> [19].

Fuel	% hydrogen (weight)	LHV MJ/kg	LHV kWh/kg	g CO <sub>2</sub> per kWh	% CO <sub>2</sub> reduction
Methane (NG/biomethane)	25,0%	50,0	13,89	198,0	29,2
Propane (LPG)	18,2%	45,6	12,67	236,8	15,3
Butane (LPG)	17,2%	45,3	12,58	241,2	13,7
Diesel	13,5%	42,7	11,86	267,5	4,3
Gasoline	13,5%	42,4	11,77	279,5	0,0

Figura 46 Características físicas y emisiones [19].



### 5.1.10 Diseño del Intercambiador de Calor

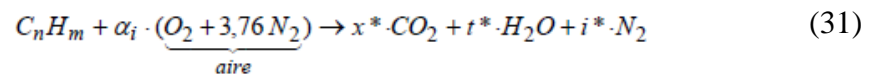
Para realizar el diseño del intercambiador de calor, previamente, es necesario obtener la ecuación estequiométrica de combustión del GLP, la relación aire-combustible, y finalmente la temperatura máxima de la llama adiabática.

La ecuación estequiométrica de combustión del GLP, está expresada de la siguiente forma: COMBUSTIBLE + AIRE = PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN. Como se mencionó anteriormente el GLP, este conformado por la mezcla del propano y butano, en base a la bibliografía revisada, se recomienda utilizar los siguientes porcentajes: 60% de propano, y 40% de butano. “Los productos de combustión son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agua (H<sub>2</sub>O) y nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>). [20]” En la Figura 47, se detalla el peso molecular de los principales compuestos, utilizados para la combustión.

C	H	O	N	S	H <sub>2</sub> O	CO	CO <sub>2</sub>
gr/mol	gr/mol	gr/mol	gr/mol	gr/mol	gr/mol	gr/mol	gr/mol
12	1	16	14	32	18	28	44

Figura 47 Pesos moleculares [20].

Teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente, se realiza el arreglo de la ecuación estequiométrica de combustión GLP utilizando la Ecuación 31, para esto nos basamos en la formulación general, la cual se puede observar en la Figura 48. [20]

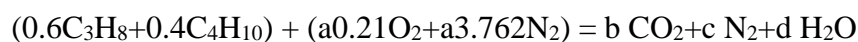


GLP+AIRE= PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

PROPANO+BUTANO+AIRE= PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN



Sabiendo que: 60% propano, 40% butano, la composición del aire: 21% O<sub>2</sub>, y 79% N<sub>2</sub>.



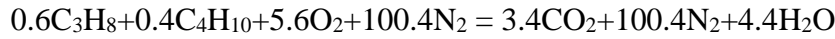
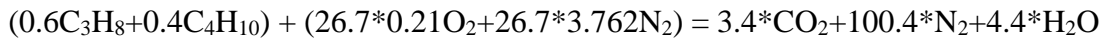
Por lo tanto:

$$[C] (0.6) (3) + (0.4) (4) = b (1); b=3.4$$

$$[H] (0.6) (8) + (0.4) (10) = d (2); d=4.4$$

$$[\text{O}] a (0.21) (2) = b (2) + d (1); a=26.7$$

$$[\text{N}] a (3.762) (2) = c (2); c=100.4$$



Con la ecuación estequiométrica de combustión GLP desarrollada, se procede a obtener el valor de la relación aire – combustible (A/F) [20], para esto se va a utilizar la Ecuación 32 y la Ecuación 33, donde np=3, mp=8, ya que la composición del propano es: C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, y nb=4, mp=10, y la composición del butano es: C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>. [20]

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{molar}} = \frac{\text{moles de aire}}{\text{moles de combustible}} = \left(n + \frac{m}{4}\right) * 4.76 \quad (32)$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{molar}} = \left[\left(3 + \frac{8}{4}\right) * 4.76\right] + \left[\left(4 + \frac{10}{4}\right) * 4.76\right] = 54.74:1$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{másica}} = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}} = \frac{\left(n + \frac{m}{4}\right) * 137.28}{(n * 12 + m * 1)} \quad (33)$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{másica}} = \left[\frac{\left(3 + \frac{8}{4}\right) * 137.28}{(3 * 12 + 8 * 1)}\right] + \left[\frac{\left(4 + \frac{10}{4}\right) * 137.28}{(4 * 12 + 10 * 1)}\right] = 31:1$$

A continuación, se determina la temperatura máxima de la flama adiabática, la cual, es la temperatura máxima que alcanzan los productos que intervienen en la combustión. “En el caso límite en que no haya pérdida de calor hacia los alrededores (Q = 0), la temperatura de los productos alcanzará un máximo, conocido como temperatura de flama adiabática o de combustión adiabática. La temperatura de flama adiabática de un proceso de combustión de flujo estacionario se determina al establecer Q=0 y W=0. [21]”, por lo tanto, la entalpia de los productos de combustión va a ser igual a la entalpia total de los reactantes (H<sub>pc</sub>=H<sub>re</sub>). Esta relación se expresa en la Ecuación 34, donde: (h<sup>o</sup>) Entalpia de formación en KJ/Kmol, y (h°) Entalpia de combustión en KJ/Kmol. [20] [21].

$$\sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) = \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) \quad (34)$$

$$(0.6) (-103850+2217900) + (0.4) (-126150 + 2875750) + (5.6) (0-8682) + (100.4) (0-8669) = (3.4) (-393520-9364) + (100.4) (h_t, N_2) + (4.4) (-285830-9904)$$

$$h_t, N_2=41039.028\text{KJ/Kmol}$$

Con el valor de entalpia del nitrógeno obtenido, se procede a obtener la temperatura máxima de la flama adiabática, utilizando la Figura 49.

<u>Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N<sub>2</sub> (conclusión)</u>			
<i>T</i>	$\bar{h}$	$\bar{u}$	$\bar{s}^\circ$
K	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol · K
1000	30,129	21,815	228.057
1020	30,784	22,304	228.706
1040	31,442	22,795	229.344
1060	32,101	23,288	229.973
1080	32,762	23,782	230.591
1100	33,426	24,280	231.199
1120	34,092	24,780	231.799
1140	34,760	25,282	232.391
1160	35,430	25,786	232.973
1180	36,104	26,291	233.549
1200	36,777	26,799	234.115
1220	37,452	27,308	234.673
1240	38,129	27,819	235.223
1260	38,807	28,331	235.766
1280	39,488	28,845	236.302
1300	40,170	29,361	236.831
1320	40,853	29,378	237.353
1340	41,539	30,398	237.867
1360	42,227	30,919	238.376
1380	42,915	31,441	238.878

*Figura 49* Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N<sub>2</sub>.

La temperatura máxima obtenida para la flama adiabática de GLP (T<sub>glp</sub>), es igual a 1325.424°K = 1052.424°C; “Las temperaturas máximas de llama reales son unos 200-300°C inferiores a la temperatura de llama adiabática. [20]”, por lo tanto, T<sub>glp</sub>, se encuentra entre 852.424°C y 752.424°C, tomando el valor de temperatura promedio, T<sub>glp</sub> = 802.424°C.

A continuación, se realizará el diseño del intercambiador de calor teniendo en cuenta las condiciones de diseño mencionadas anteriormente, para un diseño adecuado se debe realizar un proceso iterativo hasta obtener una configuración del sistema, con la cual se genere un valor mayor a la potencia total requerida por la cabina de curado ( $Q_{total}$ ), para el diseño de equipos se recomienda +20%, analíticamente se realiza el análisis y diseño del sistema en condiciones ideales, no en condiciones reales. Inicialmente se impondrán los valores necesarios para el diseño del intercambiador de calor, posteriormente se realizarán las iteraciones necesarias para obtener la configuración deseada; como se mencionó anteriormente en la Tabla 2, el intercambiador de calor idóneo para este equipo es un intercambiador de calor de carcasa y tubos, flujo cruzado, paso simple, y regenerativo.

Los valores obtenidos para el intercambiador de calor tras realizar el proceso iterativo son los siguientes: (dex) diámetro exterior del tubo  $1\ 1/2\text{in} = 38.1\text{mm}$ , (et) espesor del tubo 2mm, (din) diámetro interior del tubo 34.1mm, (Nlong) número de tubos en sentido longitudinal 5, (Ntra) número de tubos en sentido transversal 5, (Ltu) longitud de los tubos 600mm, (Npasos) número de pasos entre tubos 4, (Sl) paso longitudinal 100mm, (Pt) paso transversal 50mm, y (Pop) potencia de operación del quemador 187KBtu/h; a continuación se detallará el proceso de diseño realizado para obtener los valores mencionados anteriormente.

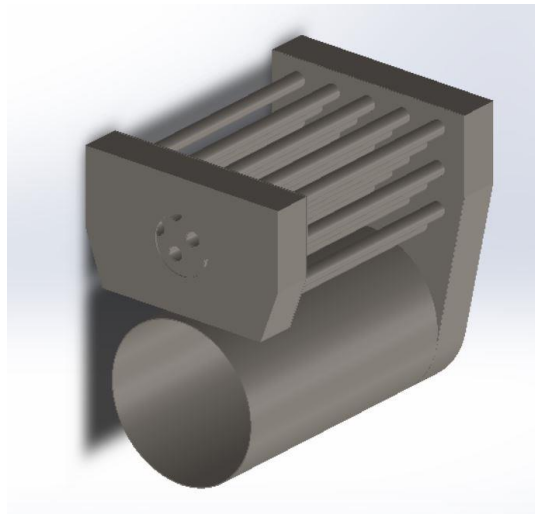
La disposición de los tubos va a ser escalonada; esta disposición en relación a la disposición alineada, se genera una mejor distribución del flujo entre las hileras de tubos que conforman el intercambiado de calor, se produce un menor porcentaje de vórtices y estancamiento del fluido entre el arreglo de tubos como se muestra en la Figura 50; por lo tanto, es necesario obtener el valor del Paso diagonal (Sd) el cual se obtiene con la Ecuación 35; el intercambiador de calor resultante, se lo puede observar en la Figura 51. [9]



**Figura 50** Disposición Alineada, y Escalonada [9].

$$Sd = \sqrt{Sl^2 + (St/2)^2} \quad (35)$$

$$Sd = \sqrt{(100mm)^2 + (50mm/2)^2} = 103.078mm$$



**Figura 51** Intercambiador de calor final.

**Fuente:** Autores.

El quemador a utilizar dentro del sistema es un quemador GLP GULLIVER BSF SERIES BS2F 35KW – 91KW, en la Figura 52 se presenta el quemador utilizado; donde se definió una potencia de operación inicial de 150000 Btu/hr (Pop). Como se puede observar la potencia de operación utilizada es menor a la potencia de operación máxima del quemador, “esto es recomendable para cuidar la vida útil del quemador [22].”



Figura 52 Quemadores GULLIVER BS2F [22].

A continuación, se determina la temperatura de salida de los gases de combustión ( $T_{gc}$ ), para la obtención de este valor es necesario, obtener el flujo másico total ( $m_{total}$ ), el cual se obtiene realizando la suma del flujo másico del GLP ( $m_{glp}$ ), con el flujo másico del aire ( $m_{air}$ ), como se muestra en la Ecuación 36, donde ( $C_{glp}$ ) es el poder calorífico del combustible GLP, se obtiene de la Figura 44, y ( $A/F$  molar) Relación aire combustible molar. [9] [12]

$$m_{total} = m_{glp} + m_{air} \quad (36)$$

$$m_{total} = \frac{Pop}{C_{glp}} + \left( \frac{Pop}{C_{glp}} * \frac{A}{F} \right)$$

$$m_{total} = \frac{150000Btu/hr}{47128.218Btu/Kg} + \left( \frac{\frac{150000Btu}{hr}}{\frac{47128.218Btu}{Kg}} * 54.74 \right) = \frac{177.41Kg}{hr}$$

$$= 0.049Kg/s$$

Una vez determinado el flujo másico total, se procede a calcular, la Temperatura de salida de los gases de combustión ( $T_{gcom}$ ), utilizando la Ecuación 37, donde: ( $T_{glp}$ ) temperatura máxima de la flama adiabática GLP =  $1075.424^{\circ}K = 802.424^{\circ}C$ , ( $C_{pair}$ ) calor específico del aire a la temperatura  $T_{glp}$ . Utilizando la Figura 53, ( $Q_{total}$ ) la potencia total requerida por la cabina de curado, y flujo másico total ( $m_{total}$ ). [9] [6]

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p$ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad t�mica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad t�mica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Figura 53 Propiedades físicas del aire [12].

$$T_{gcom} = T_{glp} - \frac{Q_{total}}{m_{total} * C_{pair}} \quad (37)$$

$$T_{gcom} = 1075.424^\circ\text{K} - \frac{24844\text{W}}{\frac{0.049\text{Kg}}{\text{s}} + \frac{1153.388\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}} = 1053.885^\circ\text{K} = 780.885^\circ\text{C}$$

El caudal de los gases de combustión ( $Q_{com}$ ), utilizando la Ecuación 38, donde: (G) Factor de corrección por la diferencia de altitudes, ( $\rho_{gcom}$ ) Densidad del aire a la temperatura  $T_{gcom}$ , este valor se obtiene de la Figura 53, y el Flujo másico total ( $m_{total}$ ). [9]

$$Q_{com} = \frac{m_{total}}{\rho_{gcom} * G} \quad (38)$$

$$Q_{com} = \frac{0.049\text{Kg/s}}{0.334\text{Kg/m}^3 * 0.766} = 0.192\text{m}^3/\text{s}$$

La temperatura del aire posterior al intercambiador de calor ( $T_{pos}$ ), se obtiene utilizando la Ecuación 39, donde: ( $T_{min}$ ) temperatura ambiente, ( $Q_{total}$ ) la potencia total requerida por la cabina de curado, (G) factor de corrección por la diferencia de altitudes, ( $m_{air}$ ) flujo másico del aire, y ( $C_{pair2}$ ) calor específico del aire a  $T_{min}$ , este valor se obtiene utilizando la Figura 36. [9] [6]

$$T_{pos} = \frac{Q_{total}}{m_{air} * C_{pair2}} \quad (39)$$

$$T_{pos} = \frac{24844\text{W}}{\frac{0.0484\text{Kg}}{\text{s}} * 1007\text{J/Kg}^\circ\text{K}} = 509.738^\circ\text{K} = 236.738^\circ\text{C}$$

A continuación, se determinará el coeficiente de transferencia de calor externo ( $h_{et}$ ), ya que la parte superficial de los tubos, por la transferencia de calor, se genera una convección de calor hacia el flujo del fluido, para determinar este valor, es necesario determinar los siguientes parámetros: la velocidad máxima del aire para un arreglo escalonado ( $V_{amax}$ ), el número de Reynolds, y el número de Nusselt, por lo tanto, se empezara determinado la velocidad máxima para el arreglo de tubos escalonado, para esto se debe obtener el caudal interno de la cabina de curado ( $Q_{cab}$ ), utilizando la Ecuación 40, donde: ( $A_{t1}$ ) área transversal del flujo, ( $v_f$ ) velocidad del fluido al interior de la cámara de curado. [9] [12]

$$Q_{cab} = A_{t1} * v_f \quad (40)$$

$$Q_{cab} = 6.25m^2 * 0.229m/s = 1.431m^3/s$$

Con el valor de caudal, se obtiene el valor de la velocidad del aire ( $V_a$ ), utilizando la Ecuación 41, donde ( $A_{itcm}$ ) es el área del flujo de aire del intercambiador de calor. (41) [12]

$$V_a = \frac{Q_{cad}}{A_{itcm}} = \frac{1.431m^3/s}{0.6m * 0.5m} = 4.77m/s \quad (41)$$

A continuación, se determinará el número de Reynolds, para obtener este valor se requiere determinar la velocidad máxima del aire para un arreglo escalonado ( $V_{amax}$ ), utilizando la Ecuación 41, se cumple la primera condición. [9]

$$2 (S_d - d_{ext}) L_{tu} > (P_t - d_{ex}) L_{tu}$$

$$2 (103.078mm - 38.1mm) 600mm > (50mm - 38.1mm) 600mm$$

$$77973.6mm^2 > 7140mm^2 \text{ Cumple la condición}$$

$$2(S_d - d_{ex}) < (P_t - d_{ex})$$

$$2(103.078mm - 38.1mm) < (50mm - 38.1mm)$$

$$129.956mm < 11.9mm \text{ No cumple la condición}$$

$$V_{max} = \frac{P_t}{P_t - d_{ex}} * V_a$$

$$V_{max} = \frac{0.05m}{0.05m - 0.0381m} * 4.77m/s = 20.042m/s$$



El número de Reynolds máximo, se lo determina con la Ecuación 42, donde ( $\nu_a$ ) viscosidad cinemática del aire a  $T_{min}$ , este valor se obtiene de la Figura 36. [9] [12]

$$Remax = Vmax * \frac{dex}{\nu_a} \quad (42)$$

$$Remax = 20.042m/s * \frac{0.0381m}{\frac{1.498 \times 10^{-5} m^2}{s}} = 50974.646$$

Para determinar el número de Nusselt, de un banco de tubos escalonado, se utiliza una correlación específica, dependiendo del valor del número de Reynolds, esta correlación se la obtiene de la Figura 54, ya que el intercambiador planteado, tiene un número de filas ( $N_L$ ) < 16, es necesario aplicar un factor de corrección (F), el cual se lo determina utilizando la Figura 55, “donde Todas las propiedades, excepto  $Pr_s$ , se deben evaluar en la media aritmética de las temperaturas de admisión y de salida del fluido ( $Pr_s$  se debe evaluar en  $T_s$ ). [9]”, donde:  $T_s = T_{pos} = 236.738^\circ C$ , y la temperatura media =  $(T_{pos} - T_{min}) / 2 = 109.369^\circ C$ , las propiedades físicas del aire a distintas temperaturas, se obtiene de la Figura 56, por lo tanto, el número de Nusselt, se lo obtiene con la Ecuación 43. [9]

$$Nu_{et} = 0.35 \left( \frac{Pt}{Pl} \right)^2 * Remax^{0.6} Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (43)$$

$$Nu_{et} = 0.35 \left( \frac{0.05m}{0.1m} \right)^2 * 50974.646^{0.6} 0.709^{0.36} \left( \frac{0.709}{0.695} \right)^{0.25} = 51.858$$

Factor de corrección para 4 filas;  $F=0.89$ , por lo tanto,  $Nu_{et}=0.89*51.858=46.154$

Finalmente, se obtiene el valor del coeficiente de transferencia de calor externo ( $het$ ), utilizando la Ecuación 44, donde ( $k_{ain}$ ) Es la conductividad térmica del aire a  $T_{pos}$ , este valor se lo obtiene de la Figura 56. [9] [6]

$$het = \frac{Nu_{et} * K_{ain}}{dex} \quad (44)$$

$$het = \frac{46.154 * 0.0402W/mK}{0.0381m} = 48.698W/m^2K$$

Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para  $N > 16$  y  $0.7 < Pr < 500$  (tomado de Zukauskas, 1987)\*

Disposición	Rango de $Re_D$	Correlación
Alineados	0-100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100-1 000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500-1 000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.031 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

\*Todas las propiedades, excepto  $Pr_s$ , se deben evaluar en la media aritmética de las temperaturas de admisión y de salida del fluido ( $Pr_s$  se debe evaluar en  $T_s$ ).

Figura 54 Correlaciones del número de Nusselt [9].

Factor de corrección  $F$  que debe usarse en  $Nu_{D, N_L} = F Nu_D$  para  $N_L < 16$  y  $Re_D > 1 000$  (tomado de Zukauskas, 1987)

$N_L$	1	2	3	4	5	7	10	13
Alineados	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Figura 55 Factor de corrección  $F$  [9].

Temp. $T$ , °C	Densidad $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Calor específico $c_p$ , J/kg · K	Conductividad térmica $k$ , W/m · K	Difusividad térmica $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s	Viscosidad dinámica $\mu$ , kg/m · s	Viscosidad cinemática $\nu$ , m <sup>2</sup> /s	Número de Prandtl $Pr$
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935

Figura 56 Propiedades físicas del aire [12].

Una vez calculado el coeficiente de transferencia de calor externo ( $h_{et}$ ), se procede a obtener el coeficiente de transferencia de calor interno ( $h_{in}$ ), este coeficiente se calcula en base a los gases de combustión, que fluyen por la parte interna de los tubos que conforman el intercambiador de calor. Previamente es necesario determinar los siguientes datos: ( $A_{fg}$ ) el área del flujo de los gases de combustión, ( $V_{gc}$ ) Velocidad de los gases de combustión, ( $Re_{in}$ ) el número de Reynolds, y finalmente ( $Nu_{in}$ ) el número de Nussel Como primer paso, se va a determinar el área del flujo de los gases de combustión, esta área  $A_{fg}$ , se obtiene sumando el área superficial de ingreso de todos los tubos que conforman el intercambiador de calor. Como se mencionó anteriormente, existen veinte y cinco tubos, por lo tanto, utilizando la Ecuación 45, se obtiene el valor deseado, donde ( $A_{int}$ ) Es el área interna de un solo tubo.

$$Afg = Aint * 25 \quad (45)$$

$$Afg = (\pi * rin)^2 * 25 = 3.653 \times 10^{-3} m^2 * 25 = 0.091 m^2$$

Con el valor de Afg definido, se determina la velocidad de los gases de combustión, para esto se utiliza la Ecuación 46, donde: (Qcom) El caudal de los gases de combustión. [9] [12]

$$Vgc = \frac{Qcom}{Afg} \quad (46)$$

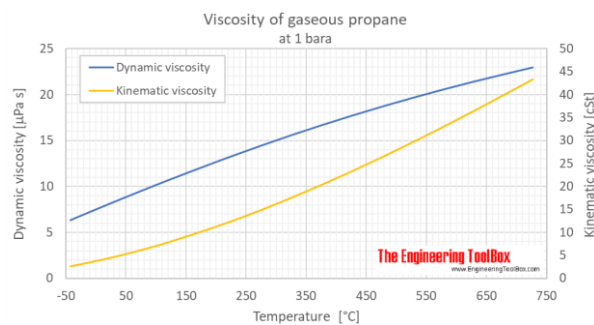
$$Vgc = \frac{0.192 m^3/s}{0.091 m^2} = 2.11 m/s$$

Una vez definido Vgc, se puede determinar el número de Reynolds, utilizando la Ecuación 47, donde: (din) Diámetro interno del tubo, y (vgc) Viscosidad cinemática de los gases de combustión, a la temperatura de salida de los gases de combustión (Tgcom), la cual se obtiene de la Figura 57. [9] [6]

$$vgc = 0.000042 m^2/s$$

$$Rein = Vgc * \frac{din}{vgc} \quad (47)$$

$$Rein = \frac{2.11 m}{s} * \frac{0.0341 m}{\frac{0.000042 m^2}{s}} = 1713.119$$



**Figura 57** Viscosidad cinemática de los gases de combustión [23].

“Para flujo interno en una tubería circular, el valor generalmente aceptado del número de Reynolds crítico es  $Recr = 2\ 300$  [12].”

$Re \approx 2\ 300$	flujo laminar
$2\ 300 \approx Re \approx 4\ 000$	flujo transicional
$Re \approx 4\ 000$	flujo turbulento

Figura 58 Número de Reynolds Tubería Circular [12].

Como se puede observar en la Figura 58, se tiene un flujo laminar al interior de los tubos del intercambiador de calor, por lo tanto, para determinar el número de Nusselt ( $Nu_{in}$ ), se debe utilizar las correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt, para la convección natural sobre superficies, se obtiene de la Figura 59, y se desarrolla con la Ecuación 48, ( $d_{in}$ ) Diámetro interno del tubo, y ( $RaD$ ) Número de Rayleigh, el cual se obtiene con la Ecuación 49, donde ( $g$ ) gravedad, el valor de  $Pr$  se obtiene de la Figura 53, a una temperatura  $T_{gcom}$ . [9]

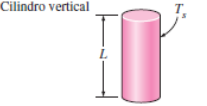
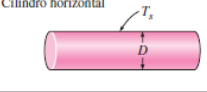
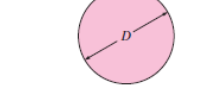
$$Nu_{in} = \left[ 0.6 + \frac{0.387 * RaD^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (48)$$

$$RaD = \frac{g * \beta * (T_{gcom} - T_{min}) * d_{in}^3}{\nu g c^2} \quad (49)$$

$$RaD = \frac{9.81m/s^2 * \frac{1}{\frac{1053.885^\circ K + 283^\circ K}{2}} * (1053.885^\circ K - 283^\circ K) * 0.0341m^3}{(0.000042m^2/s)^2}$$

$$= 254307.462$$

$$Nu_{in} = \left[ 0.6 + \frac{0.387 * 254307.462^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.559}{0.714} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 = 9.975$$

 <p>Cilindro vertical</p>	L		<p>Un cilindro vertical puede tratarse como una placa vertical cuando</p> $D \geq \frac{35L}{Gr_L^{0.4}}$
 <p>Cilindro horizontal</p>	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{1/4}]^{0.25}} \right\}^2 \quad (9-25)$
 <p>Esfera</p>	D	$Ra_D \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0.7)$	$Nu = 2 + \frac{0.589 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{1/4}]^{0.25}} \quad (9-26)$

**Figura 59** Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies [9].

Con el valor  $Nu_{in}$ , finalmente se puede determinar el coeficiente de transferencia de calor interno ( $h_{in}$ ) [24], utilizando la Ecuación 50, donde: ( $K_{gcom}$ ) Conductividad térmica de los gases de combustión. [9] [6]

$$h_{in} = Nu_{in} \frac{K_{gcom}}{d_{in}} \quad (50)$$

$$h_{in} = 9.975 \frac{0.161 W/mK}{0.0341 m} = 47.096 W/m^2 K$$

Una vez determinados los coeficientes de transferencia de calor, se debe establecer la diferencia media logarítmica de temperaturas (LMTD), con esta esta relación, se obtiene la temperatura real a lo largo del perfil de temperaturas que existen dentro del sistema, para esto se utiliza la Ecuación 50, donde: [9] [12]

$$LMTD = \frac{(T_{gcom} - T_{min}) - (T_{glp} - T_{pos})}{\ln \left( \frac{T_{gcom} - T_{min}}{T_{glp} - T_{pos}} \right)} \quad (51)$$

$$LMTD = \frac{(780.885^\circ C - 10^\circ C) - (802.424^\circ C - 236.738^\circ C)}{\ln \left( \frac{780.885^\circ C - 10^\circ C}{802.424^\circ C - 236.738^\circ C} \right)} = 663.002^\circ C$$

Para obtener un valor más preciso, es necesario aplicar un factor de corrección (F) dependiendo del arreglo de tubos del intercambiador de calor, se obtiene de la Figura 60, por lo tanto, los factores R y P, resultan:

$$P = \frac{T_{glp} - T_{pos}}{T_{gcom} - T_{pos}} = \frac{802.424^\circ C - 236.738^\circ C}{780.885^\circ C - 236.738^\circ C} = 1.04$$

$$R = \frac{T_{gcom} - T_{min}}{T_{glp} - T_{pos}} = \frac{780.885^\circ C - 10^\circ C}{802.424^\circ C - 236.738^\circ C} = 1.349$$

$$F=1$$

$$LMTD = 663.002^{\circ}C$$

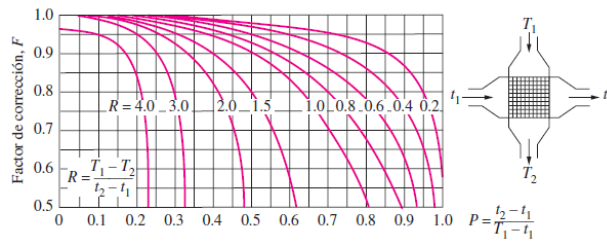


Figura 60 Flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado [9].

A continuación, se determinará el coeficiente de transferencia de calor, del intercambiador de calor, como se puede observar en la Figura 61. Para la analogía de resistencias de un tubo, existe convección de aire interna, externa, y conducción en el espesor del tubo, por lo tanto, el coeficiente global de transferencia de calor ( $U_{total}$ ), está definido por la Ecuación 52, donde ( $K_{tub}$ ) Es la conductividad térmica del tubo y se lo obtiene de la Figura 32. [9]

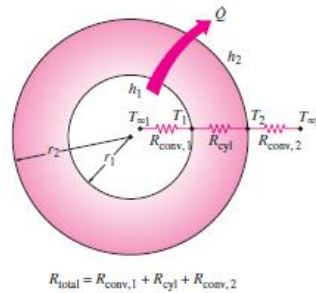


Figura 61 Analogía resistencias de un tubo [9].

$$U_{total} = \frac{1}{\frac{1}{h_{et}} * \frac{d_{ex}}{2K_{tub}} * \ln\left(\frac{d_{ex}}{d_{in}}\right) + \frac{d_{in}}{d_{ex} * h_{in}}} \quad (52)$$

$U_{total}$

$$= \frac{1}{\frac{1}{48.698W/m^2K} * \frac{0.0381m}{2 * 487J/Kg K} * \ln\left(\frac{0.0381m}{0.0341m}\right) + \frac{0.0341m}{0.0381m * 47.096W/m^2K}}$$

$$U_{total} = \frac{1}{0.019} = 52.632W/m^2s$$

Por lo tanto, el calor transferido por el intercambiador de calor ( $Q_{int}$ ), se determina utilizando la Ecuación 53, donde: ( $A_{tfc}$ ) es el area de transferencia de calor total del intercambiador de calor.

$$Q_{int} = U_{total} * (\pi * dex * Ltu * Nlong * Ntra * Psimple) * LMTD \quad (53) \quad [9] \quad [6]$$

$$Q_{int} = 52.623W/m^2s * (\pi * 0.0381m * 0.6m * 5 * 5 * 1) * 663.002^\circ C \quad (53)$$

$$Q_{int} = 62640.692W = 62.641KW$$

Finalmente, se determinará el calor total transferido por el intercambiador de calor ( $Q_{ICtotal}$ ), para esto se necesita el calor transferido por la cámara de combustión ( $Q_{cc}$ ), ya que  $Q_{ICtotal} = Q_{int} + Q_{cc}$ , para determinar este valor, previamente se deben obtener los siguientes valores: ( $V_{fcc}$ ) Velocidad del flujo cámara de combustión, ( $Re_{cc}$ ) Número de Reynolds cámara de combustión, ( $N_{ncc}$ ) Número de Nusselt cámara de combustión, y finalmente el coeficiente de convección ( $h_{cc}$ ), el valor de  $V_{fcc}$  se obtiene con la Ecuación 54, donde: ( $A_{fcc}$ ) Área transversal del flujo de la cámara de combustión, el ancho A, se lo obtiene de la Figura 62, ( $r_{tcc}$ ) Radio tubo cámara de combustión. [9]

$$V_{fcc} = \frac{Q_{cab}}{A_{fcc}} \quad (54)$$

$$V_{fcc} = \frac{Q_{cab}}{A * Ltu} = \frac{1.431m^3/s}{0.254m * 0.6m} = 9.54m/s$$

Entrada Btu/hr (kW)	Área del suelo Pulgadas cuad. (cm <sup>2</sup> )	Ancho y longitud preferidos en pulgadas (cm)
65,000 (19)	63 (407)	7 (17.8) x 9 (22.9)
75,000 (22)	63 (407)	7 (17.8) x 9 (22.9)
100,000 (29)	71 ¼ (460)	7 ½ (19.1) x 9 ½ (24.1)
150,000 (44)	110 (710)	10 (25.4) x 11 (27.9)
200,000 (59)	165 (1065)	11 (27.9) x 15 (38.1)

**Figura 62** Cámara de combustión solo para P265F [25].

A continuación, obtenemos el Número de Reynolds para la cámara de combustión ( $Re_{cc}$ ), utilizando la Ecuación 55, donde: ( $d_{cc}$ ) Es el diámetro de la cámara de combustión. [9]

$$Re_{cc} = V_{fcc} * \frac{d_{cc}}{\nu_{gc}} \quad (55)$$

$$Re_{cc} = \frac{9.54m}{s} * \frac{0.102m}{\frac{0.000042m^2}{s}} = 2428.571$$

Una vez determinado el número de Reynold, se obtiene el valor del Número de Nusselt para la cámara de combustión ( $N_{ncc}$ ), para flujo cruzado sobre cilindros, este se determina con la Ecuación 56.

“Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura de película, la cual es el promedio de las temperaturas de la corriente libre y de la superficie [9].” [12]

$$N_{ncc} = 0.3 + \frac{0.62 * Re_{cc}^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{cc}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (56)$$

$$N_{ncc} = 0.3 + \frac{0.62 * 2428.571^{1/2} * 0.714^{1/3}}{\left[1 + (0.4/0.714)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{2428.571}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} = 25.272$$

El coeficiente de convección ( $h_{cc}$ ), se lo determina utilizando la Ecuación 57. [9] [6]

$$h_{cc} = \frac{K_{gcom} * N_{ncc}}{d_{cc}} \quad (57)$$

$$h_{cc} = \frac{0.161W/mK * 25.272}{0.102m} = 38.89W/m^2K$$

Una vez determinados estos valores, se obtiene el calor total transferido por el intercambiador de calor ( $Q_{ICtotal}$ ), utilizando la Ecuación 58. [9] [6]

$$Q_{ICtotal} = \frac{h_{cc} * \pi * d_{cc} * L_{tu} * T_{gcom}}{1000} \quad (58)$$

$$Q_{ICtotal} = \frac{38.89W/m^2K * \pi * 0.102m * 0.6m * 780.885^\circ C}{1000} = 5.989KW$$

Por lo tanto:

$$Q_{ICtotal} = Q_{int} + Q_{cc}$$

$$Q_{ICtotal} = 62.641KW + 5.989KW$$

$$Q_{ICtotal} = 68.63KW$$



Como se mencionó anteriormente, es necesario obtener un valor  $Q_{int}$  mayor a la potencia total requerida por la cabina de curado  $Q_{total}$ , para el diseño de equipos se recomienda  $Q_{total}+20\%$ , porque analíticamente, se realiza el análisis del equipo en condiciones ideales, no en condiciones reales, adicionalmente a esto debido a la altitud a la que se encuentra la ciudad de Cuenca – Ecuador, es de 2500m, “por cada 1000 pies de altura pierde un 2% de potencia el quemador [25]”, por lo tanto, se genera una pérdida de -17%.

$$Q_{ICtotal-17\%} \geq Q_{total+20\%}$$

$$59.963KW > 55.557KW$$

Se puede apreciar que se cumple la condición, por lo tanto, los parámetros de diseño, para el intercambiador de calor, es correcto. Para la evacuación de los gases de combustión generados por el quemador del intercambiador de calor, es necesario realizar una salida denominada chimenea.

**Tabla 5** Tamaño conducto gases de combustión.

No más de 6,500 Btu/hr (1.905 Kw) por pulgada cuadrada (645.2 mm <sup>2</sup> ) de la zona de combustión	
Entrada - Btu/hr (Kw)	Tamaño de campana de extracción y conducto de humos
Hasta --- 120,000 (35)	5 pulgadas (127 mm)
120,000 (35.17) --- 180,000 (53)	6 pulgadas (152 mm)
180,000 (52.75) --- 250,000 (73)	7 pulgadas (178 mm)

**Tabla 6** Tamaño conducto gases de combustión

Entrada Btu/hr (kW)	Área del suelo Pulgadas cuad. (cm <sup>2</sup> )	Ancho y longitud preferidos en pulgadas (cm)
65,000 (19)	63 (407)	7 (17.8) x 9 (22.9)
75,000 (22)	63 (407)	7 (17.8) x 9 (22.9)
100,000 (29)	71 ¼ (460)	7 ½ (19.1) x 9 ½ (24.1)
150,000 (44)	110 (710)	10 (25.4) x 11 (27.9)
200,000 (59)	165 (1065)	11 (27.9) x 15 (38.1)

Por lo tanto, en base a la potencia de operación de 150000Btu/h determinada anteriormente, se obtiene las dimensiones para la chimenea del intercambiador de calor, las dimensiones obtenidas están basadas en la tabla 5, y tabla 6, se realizará una salida circular de 6in de diámetro.

### 5.1.11 Determinación de la eficiencia del sistema

Con los valores del calor total transferido por el intercambiador de calor ( $Q_{ICtotal}$ ), y la potencia total requerida por la cabina de curado ( $Q_{total}$ ), obtenidos anteriormente, se puede determinar la eficiencia del sistema, utilizando la Ecuación 59, donde: ( $Q_{util}=Q_{total}$ ) calor necesario para el curado de la carga, y ( $Q_{total}=Q_{ICtotal}$ ) calor generado por el intercambiador de calor. [9] [21] [6]

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{total}} \quad (59)$$

$$\eta = \frac{55.557KW}{56.963KW} * 100\% = 97.5\%$$

Como se puede observar el sistema tiene una eficiencia del 97.5%, por lo tanto, se genera una pérdida del 2.5%, esto indica que el sistema genera una pérdida de energía mínima.

### 5.1.12 Determinación de la presión requerida por el sistema

Para determinar la presión requerida por el sistema, se debe obtener los siguientes valores: caída de presión en el intercambiador de calor, Caída de presión por fricción en ductos, caída de presión en las campanas de extracción, con el resultado de la suma de estos valores, posteriormente se realizará la selección del ventilador centrífugo, para esto, es necesario conocer el caudal requerido por el sistema y la caída de presión requerida por el sistema.

Como primer punto, se determina la caída de presión en el intercambiador de calor, para esto se utiliza la Ecuación 60, donde: (f) factor de fricción para un arreglo escalonado, y (X) factor de corrección para un arreglo escalonado, estos datos se los obtiene de la Figura 65, utilizando el número de Re<sub>max</sub>, determinado anteriormente. Las propiedades del aire, se las debe determinar a la temperatura media, para obtener esta temperatura se utiliza T<sub>min</sub> y T<sub>pos</sub>, ya que T<sub>med</sub>=(T<sub>min</sub>+T<sub>pos</sub>)/2=123.369°C, utilizando la Figura 56. [9]

$$\Delta p_{IC} = N_{long} * f * X * \left( \frac{\rho * V_{max}^2}{2} \right) \quad (60)$$

$$\Delta p_{IC} = 5 * 0.2 * 1.1 * \left( \frac{0.890Kg}{m^3} * \frac{20.042m^2}{s} \right) = 196.623Pa$$

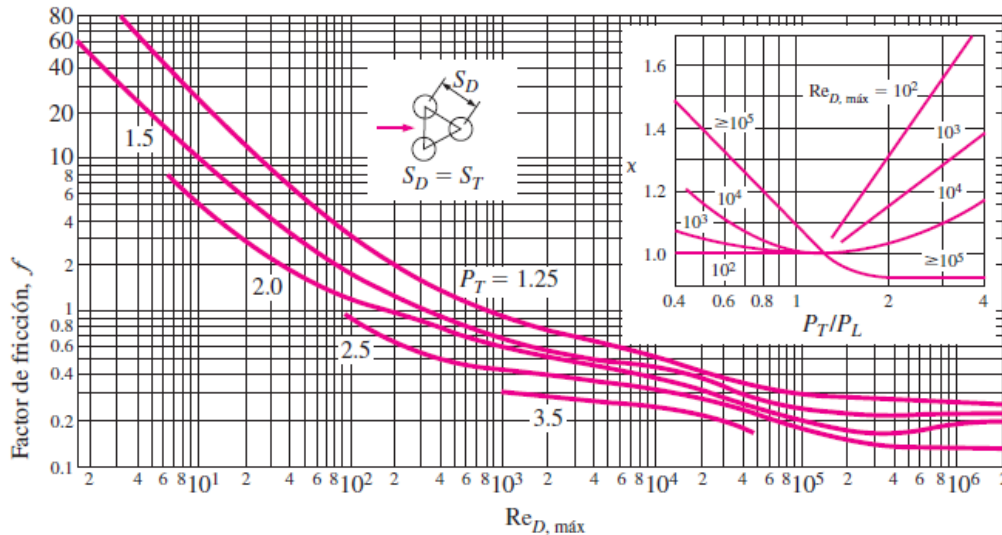
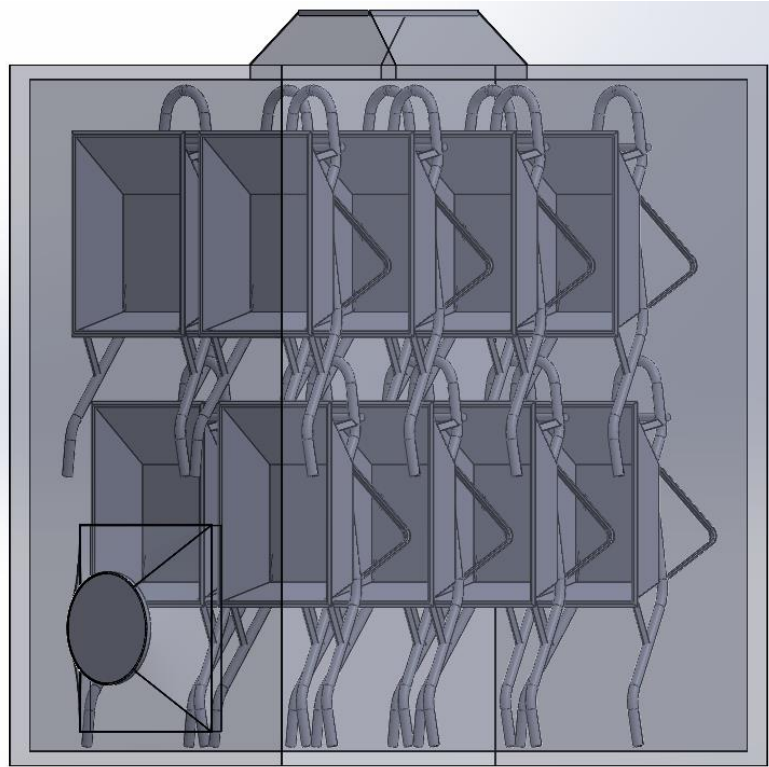


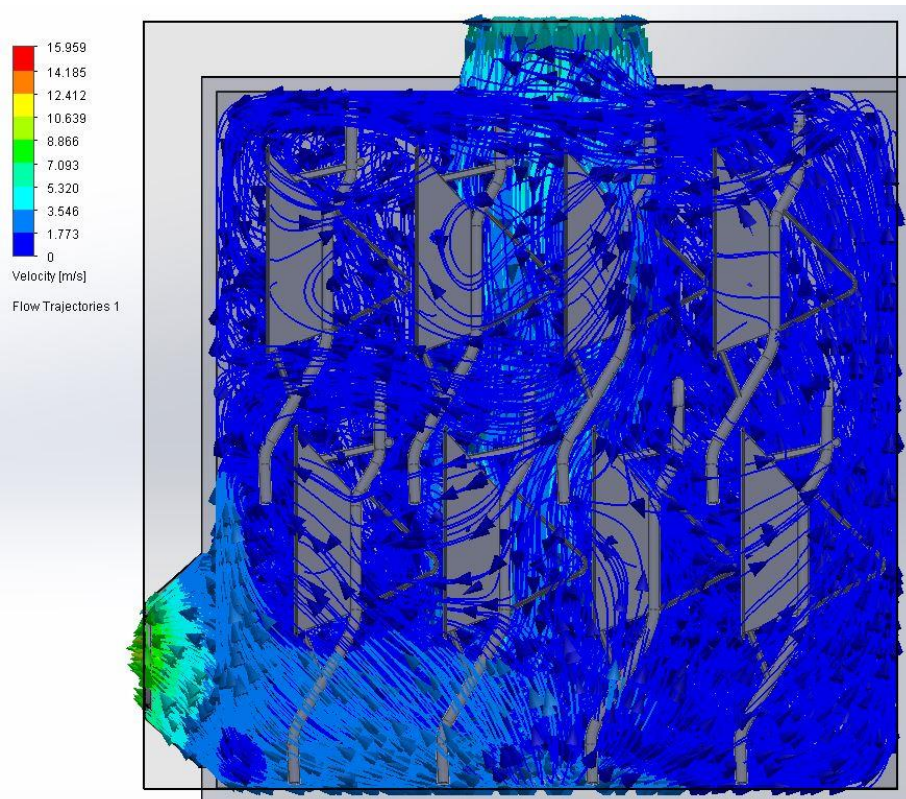
Figura 65 Factor de fricción  $f$  y factor de corrección  $X$  [9].

A continuación, se determinará la caída de presión en las campanas de la cabina de curado, como también la pérdida de presión por fricción en los ductos que la conforman, estas conectan el intercambiador de calor con la cabina de curado. Para determinar estas pérdidas de presión, previamente se tiene que definir la disposición de las campanas que conforman el sistema, ya que en base a esto se genera la trayectoria de los ductos, se realizaron varias simulaciones cambiando la disposición de las campanas, en distintas caras de la cabina de curado, este proceso de diseño, se lo realizó utilizando el software de ingeniería SOLIDWORKS FLOW SIMULATION. En las distintas simulaciones, se procedió a generar la trayectoria del flujo de aire al interior de la cabina de curado, como condiciones de operación se ingresaron distintas variables que intervienen al interior, estos valores se los puede observar en los cálculos analíticos realizados anteriormente. En la Figura 66, 67, 68 y 69, se puede apreciar el flujo de aire dentro de la cabina de curado, cabe mencionar que la forma del área de ingreso a las campanas está basada según la geometría del intercambiador de calor, también en base a las consideraciones utilizadas para el cálculo de las pérdidas de presión, las dimensiones de los distintos componentes del sistema, como también del sistema completo, se pueden observar en el apartado de Anexos.



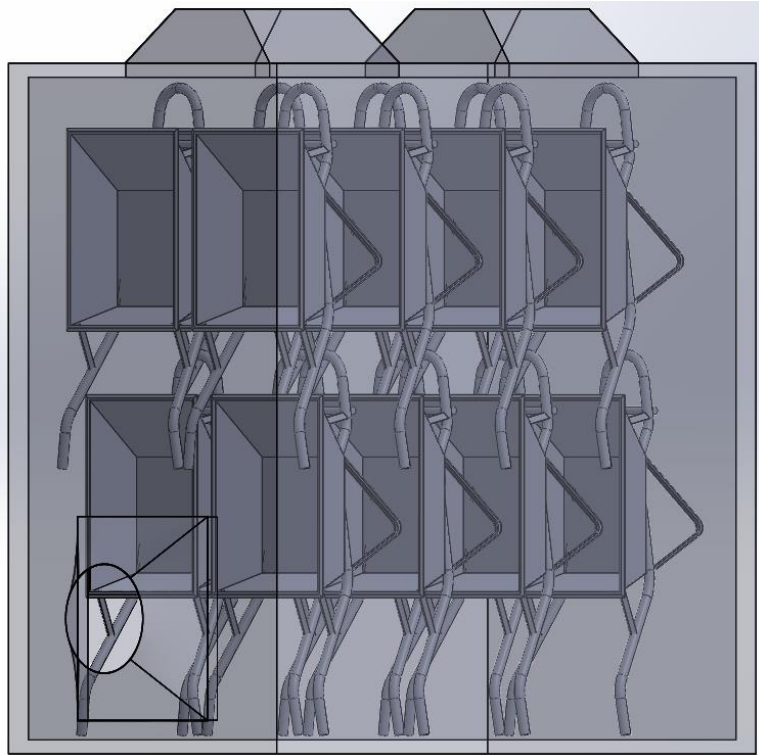
*Figura 66 Opción 1 Cabina de curado.*

*Fuente: Autores.*



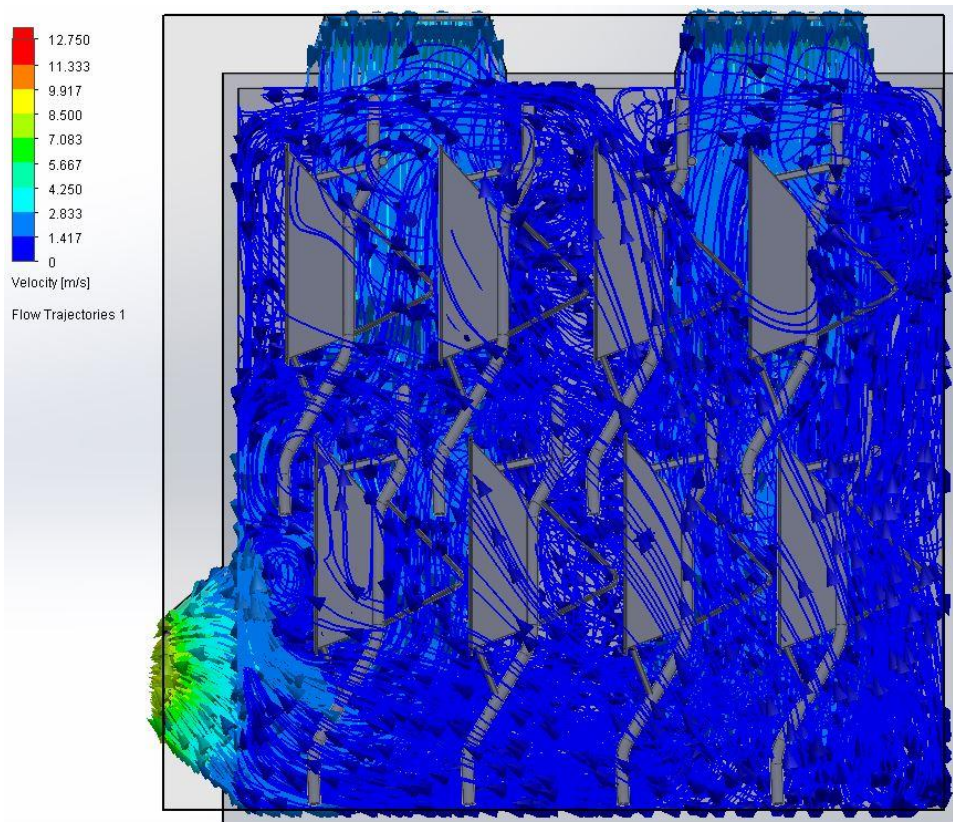
*Figura 67 Opción 1 Flujo de aire interno.*

*Fuente: Autores.*



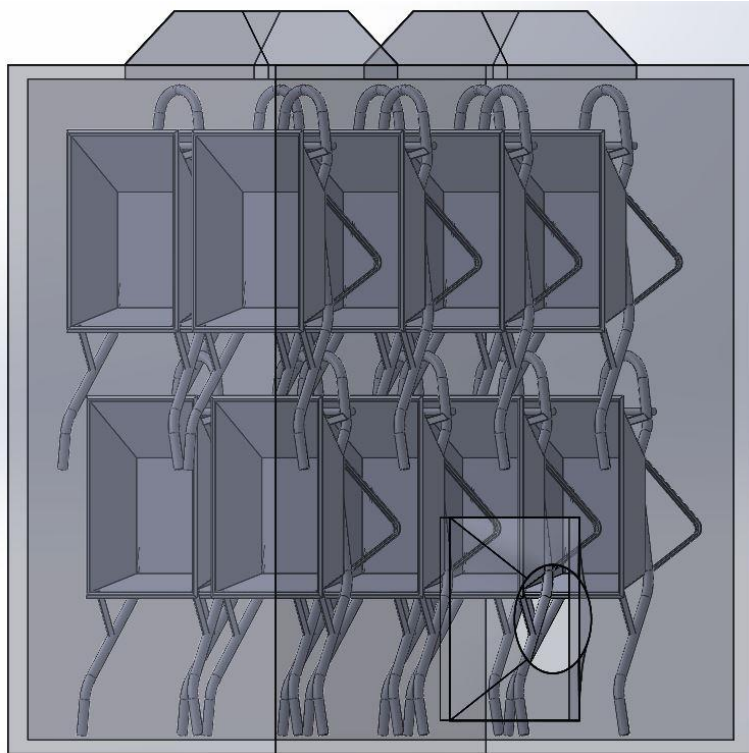
*Figura 68 Opción 2 Cabina de curado.*

*Fuente: Autores.*



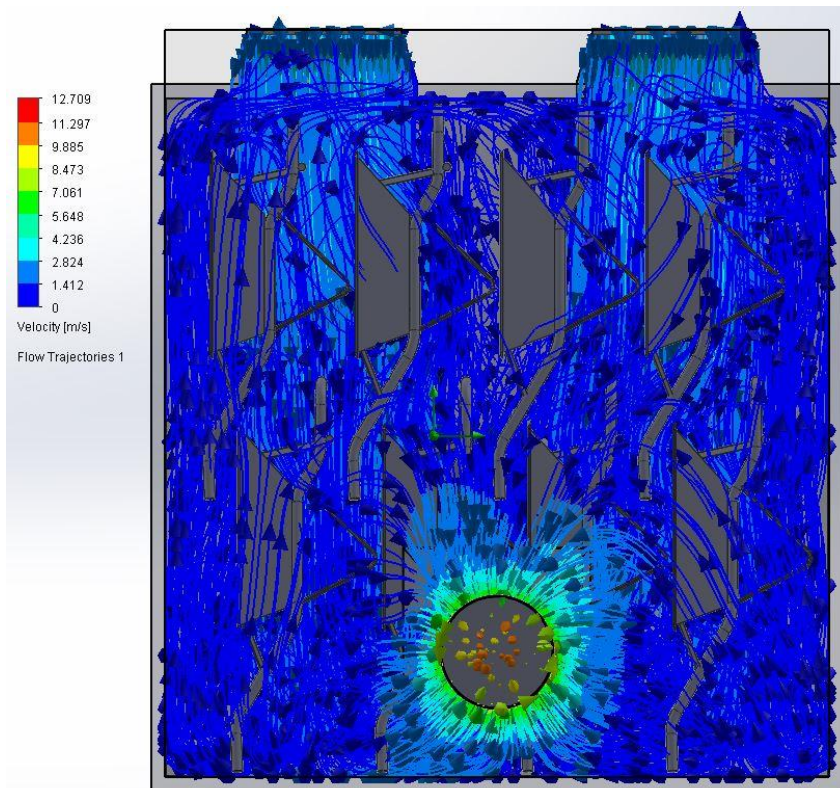
*Figura 69 Opción 2 Flujo de aire interno.*

*Fuente: Autores.*



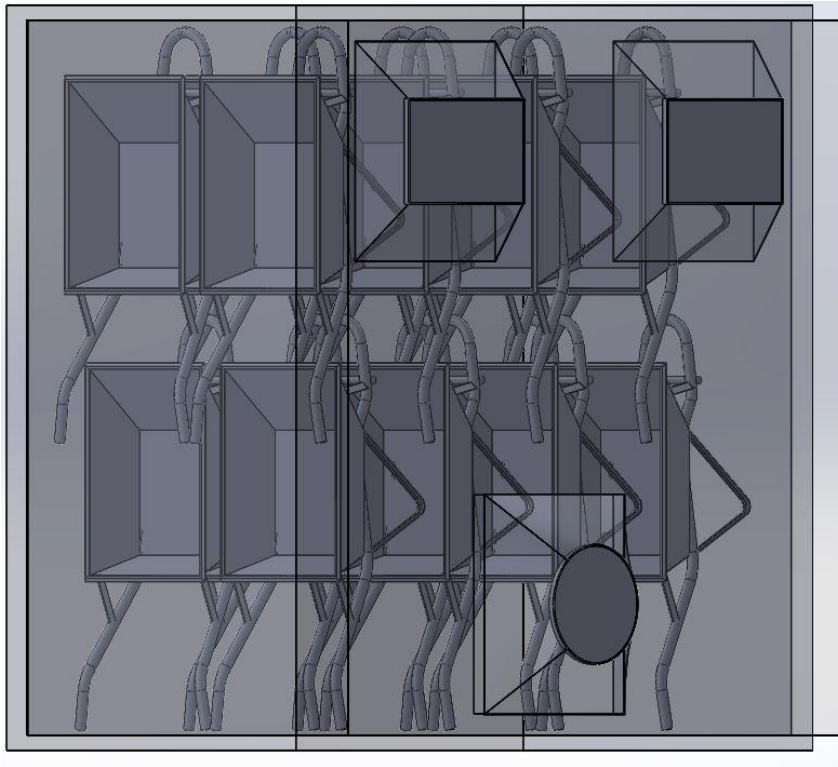
**Figura 70** Opción 3 Cabina de curado.

**Fuente:** Autores.



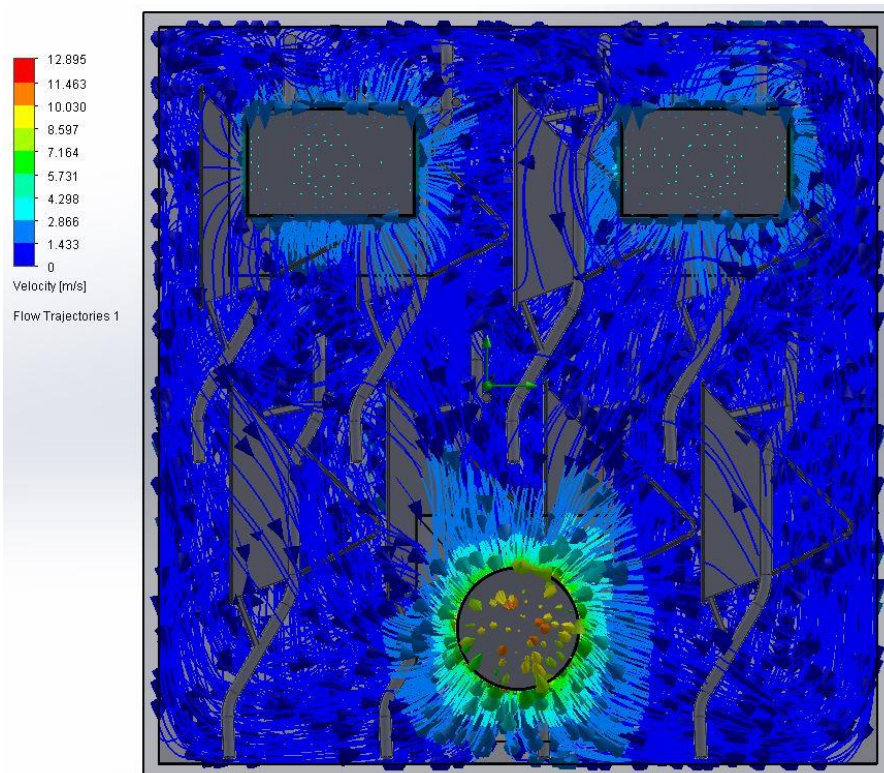
**Figura 71** Opción 3 Flujo de aire interno.

**Fuente:** Autores.



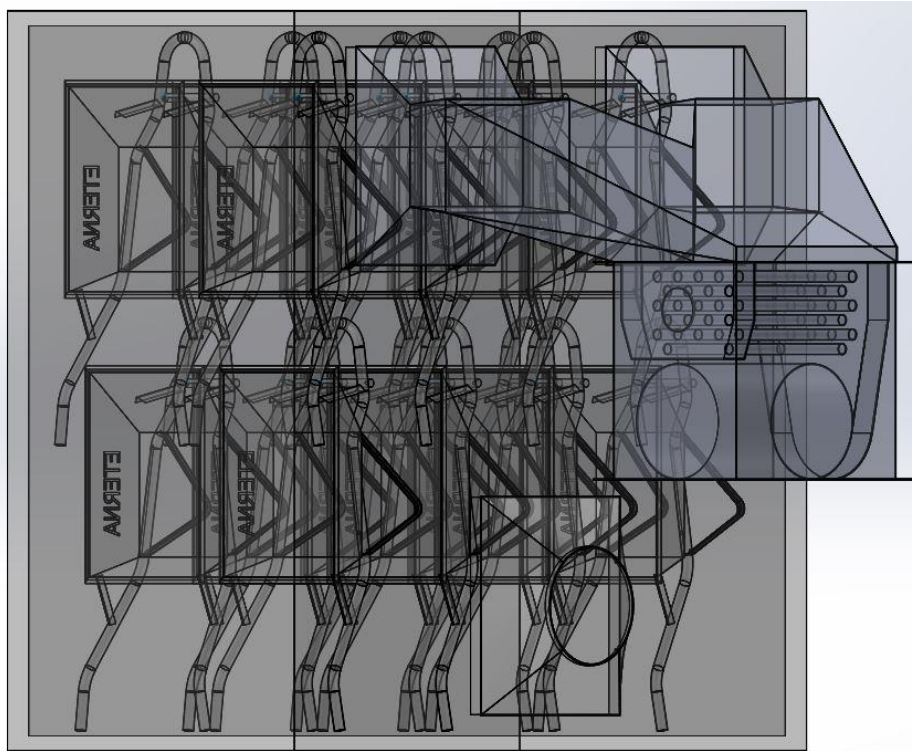
**Figura 72** Opción 4 Cabina de curado.

**Fuente:** Autores.



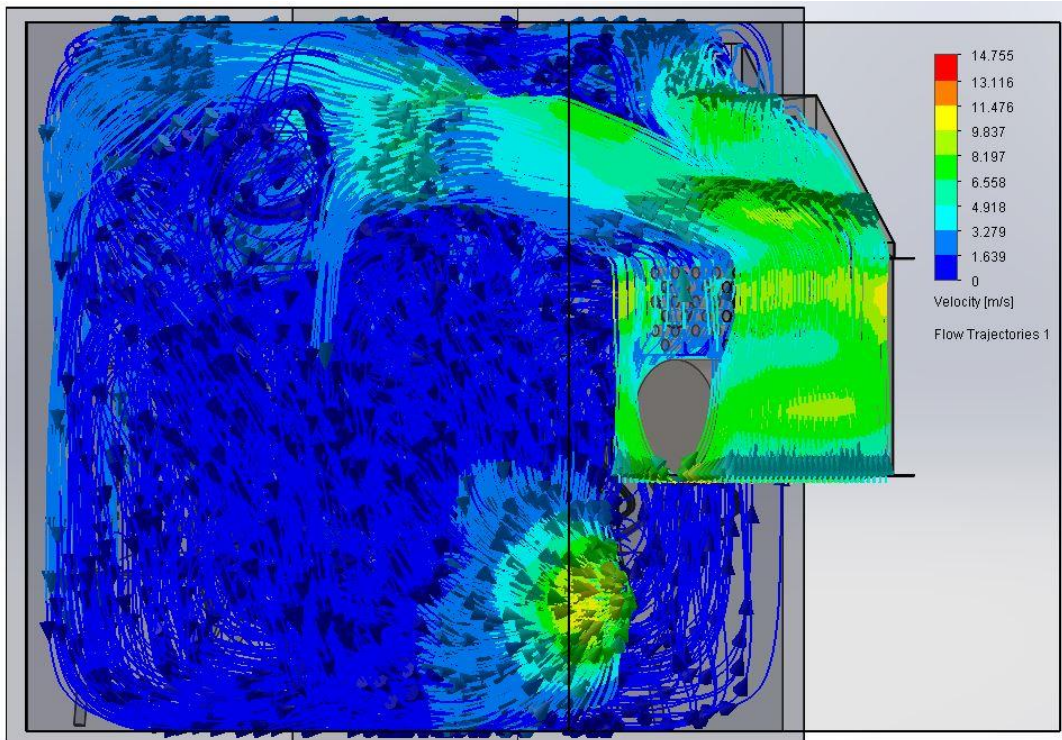
**Figura 73** Opción 4 Flujo de aire interno.

**Fuente:** Autores.



*Figura 74 Horno de curado.*

*Fuente: Autores.*



*Figura 75 Flujo de aire al interior del Horno.*

*Fuente: Autores.*



Analizando las cuatro opciones, mostradas en las Figuras 66, 68, 70, y 72, respectivamente, como también la distribución interna del flujo de aire mostrado en las Figuras 67, 69, 71 y 73, respectivamente, se puede observar claramente que en todas las distribuciones al interior de la cabina de curado existe una velocidad del flujo menor a 2m/s, se recomienda según el estado del arte realizado previamente, para poder realizar la selección de la distribución adecuado, se debe analizar los espacios fríos, y la formación de vórtices o estancamiento del flujo dentro de la cabina de curado. Como se puede observar en la opción 1, y opción 2, se genera un gran estancamiento del fluido, por lo tanto, estas dos opciones se descartan. Cómo se puede observar en la opción 3 y opción 4, existe un estancamiento del fluido menor, pero como se puede observar la opción 3 tiene una mayor área de espacios fríos con relación a la Opción 4, por lo tanto, la mejor distribución para el presente sistema es la opción 4.

Una vez determinada la mejor distribución, se procede a realizar el recorrido de los ductos que conectan la cabina de curado con el intercambiador de calor, para esto, se realizaron varias iteraciones hasta obtener una geometría que sea sencilla de fabricar, y a la vez que tenga la menor longitud posible, ya que de esta manera se reducen las pérdidas de presión por fricción, también se tomó en consideración la geometría del intercambiador, y de las campanas que se encuentran en la pared exterior de la cabina de curado, estas campanas a más de tener la capacidad de operar con el caudal deseado, ayudan a generar una mejor distribución del flujo hacia el interior del sistema. En la Figura 74, se puede apreciar la cabina de curado, con las campanas, ductos, y el intercambiador de calor. En la Figura 75 se puede apreciar la distribución del flujo de aire al interior de este sistema. A continuación, se va a realizar los cálculos analíticos necesarios para determinar las pérdidas de presión en las campanas, como la pérdida por fricción en los ductos.

Como primer punto, se determinará la pérdida de presión por las campanas, que conforman la cabina de curado, para esto, es necesario comprobar que el caudal de ingreso de la campana ( $Q_{camp}$ ), tenga la capacidad de admitir el caudal de aire interno de la cabina de curado ( $Q_{cab}=1.431m^3/s$ ). Las dimensiones de las campanas se encuentran en el apartado de Anexos, como se mencionó anteriormente, para esto se utiliza la Ecuación 61, donde: ( $V_{cap}$ ) Velocidad de captura, ( $x_{cap}$ ) Distancia al foco del flujo de aire, y ( $S_{cap}$ ) Área de entrada de la campana, el valor de  $V_{cap}$  se lo obtiene de la Figura 76.

Previamente se debe comprobar que se cumpla la siguiente condición  $W_{cap}/L_{cap} \leq 2$ , donde ( $W_{cap}$ ) Alto campana, y ( $L_{cap}$ ) Largo campana [26].

$$\frac{W_{cap}}{L_{cap}} = \frac{750mm}{675mm} = 1.111$$

Como se puede observar se cumple la condición, por lo tanto, se puede obtener el caudal de la campana. [26]

$$Q_{camp} = 0.75 * V_{cap} * (10 * x_{cap}^2 + S_{cap}) \quad (61)$$

$$Q_{camp} = 0.75 * 0.375m/s * (10 * 0.7m^2 + 0.506m^2) = 1.52m^3/s$$

**Tabla 7** Velocidades de Captación Campana

CAPTACIÓN POR CAMPANA		
TIPO DE TRABAJO	Va (m/s) Captura	Vc (m/s) Entrada
Gases o Vapores	0.25 a 0.5	12
Gases Soldadura	0.5 a 1	15
Caldera de Vapor	0.75	10
Estufa Barnizado	1 a 1.25	8
Taladrado	2	22

El caudal obtenido es mayor al caudal de operación, con un 6.22%, por lo tanto existe un dimensionamiento adecuado, para determinar la pérdida de presión en la campana, es necesario obtener el valor de la Velocidad de presión ( $V_P$ ), la cual se obtiene utilizando la Ecuación 62, donde ( $V_c$ ) Velocidad de entrada la cual se obtiene de la tabla 7. [26]

$$V_P = \left( \frac{V_c}{4.043} \right)^2 \quad (62)$$

$$V_P = \left( \frac{12m/s}{4.043} \right)^2 = 8.81mm. agua$$

En este caso se utilizará un ángulo de inclinación de 45 grados, en las paredes de la campana, el factor de corrección ( $F_{camp}$ ) para esta inclinación, se obtiene de la Figura 77, con la Ecuación 63, se obtiene la pérdida de presión resultante ( $h_{camp}$ ). [26]

$$h_{camp} = F_{camp} * V_P \quad (63)$$

$$h_{camp} = 0.15 * 8.81mm. agua = 1.321mm. agua$$

Como se mencionó anteriormente, se tiene un total de tres campanas, por lo tanto, la pérdida de presión total por campanas es igual a  $h_{totalcamp} = 1.321mm. agua * 3 = 3.963mm. agua = 0.404Pa$ .

Finalmente se determina de pérdida por fricción en los ductos ( $h_{duct}$ ), se utilizará la Ecuación 64, donde: ( $L_{duct}$ ) es la longitud total ductos, y ( $K_{duct}$ ) pérdida por fricción, esta se obtiene de la Figura 78, previamente es necesario determinar el diámetro hidráulico de ducto, ya que este valor es necesario para la utilización de la Figura 78, para obtener este valor, se utiliza la ecuación para un ducto rectangular mostrada en la Figura 77, por lo tanto el diámetro hidráulico del ducto es el siguiente:

$$D_{h_{duct}} = \frac{4 * 0.75m * 0.675m}{2(0.75m + 0.675m)} = 0.711m$$

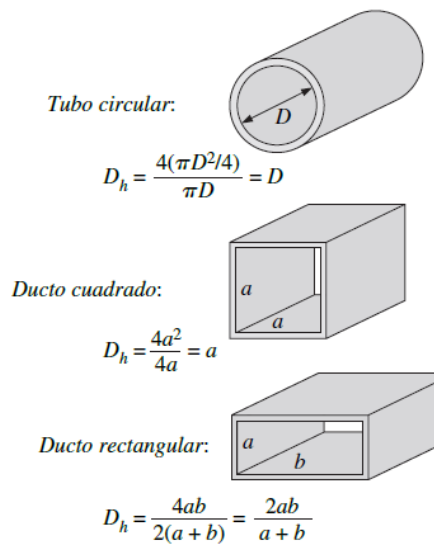


Figura 77 Diámetro hidráulico [12].

Una vez obtenido el valor del diámetro hidráulico, se procede a determinar la pérdida de presión por fricción en los ductos. [26]

$$h_{duct} = L_{uct} * K_{duct} \tag{64}$$

$$h_{duct} = 2.066m * 0.02mm. agua = 0.041mm. agua = 0.4018Pa$$

Finalmente se puede obtener la pérdida de presión total del sistema:

$$h_{sistema} = \Delta p_{IC} + h_{totalc} + h_{duct} = 196.623Pa + 0.404Pa + 0.4018Pa$$

$$h_{sistema} = 197.429Pa = 20.146mmca$$

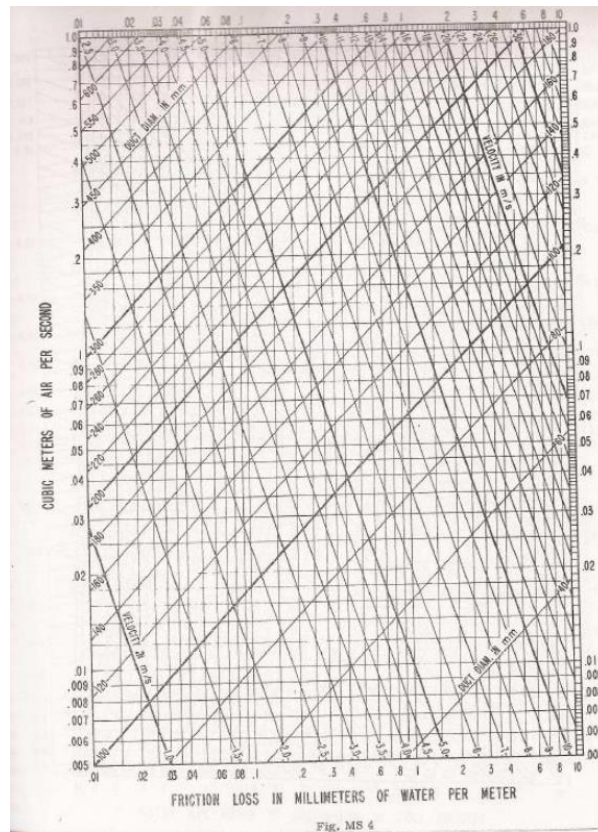
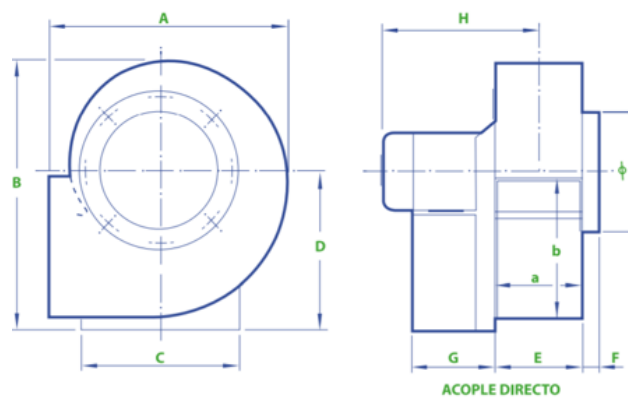


Figura 78 Pérdidas por fricción [26].

Con el valor obtenido anteriormente, se procede a realizar la selección del ventilador centrífugo, tras realizar una investigación de diferentes ventilares centrífugos existente en el mercado, se selecciona el siguiente ventilador marca Anzola.



MOTOR	A	B	C	D	E	F	G	G1	H	H1	a	b	c
3/4 HP	360	415	235	255	140	40	240	-	400	-	140	180	200
1,5 HP	435	510	320	310	180	40	270	-	450	-	180	220	250
2 HP	521	610	360	365	240	40	-	320	-	500	240	285	300
2 HP	658	806	470	485	270	60	-	320	-	660	270	385	400
5 HP	658	806	470	485	270	60	-	370	-	660	270	385	400
5 HP	751	1000	515	520	300	60	-	370	-	750	300	430	450
7,5 HP	751	1000	515	520	300	60	-	390	-	750	300	430	450

Figura 79 Ventilador centrífugo Anzola [27].

A continuación, se realiza el diseño estructural para la cabina de curado, utilizaremos el software de ingeniería SOLIDWORKS SIMULATION, no se realizará un diseño analítico, esta es una estructura compuesta compleja, por lo tanto, no es viable realizar un diseño analíticamente, se tomó en consideración que esta estructura debe soportar la carga total de las carretillas y el conjunto de paredes.

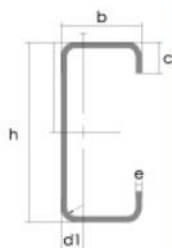
Para obtener la configuración de perfiles y tubos estructurales óptimos, variando las dimensiones, se realizó un proceso iterativo, según las características proporcionadas por el catálogo del distribuidor. Para saber que el sistema tiene configuración adecuada, se debe obtener un factor de seguridad igual o mayor a 1.6 [28], ya que este valor es el recomendado para el diseño de estructuras metálicas.

Tras el proceso iterativo se obtuvieron los siguientes resultados:

En la Figura 80, y Figura 81, se puede observar el tubo estructural, y la viga seleccionada para la estructura de la cabina de curado, respectivamente y en la Figura 82 y Figura 83 se puede observar el resultado de la simulación con los valores del desplazamiento y el esfuerzo máximo, respectivamente.

#### Especificaciones Generales:

<b>Norma:</b>	NTE INEN 1623
<b>Calidad:</b>	ASTM A36 - SAE J 403 1008
<b>Largo Normal:</b>	6.00m y medidas especiales
<b>Espesores:</b>	Desde 2mm - 12mm
<b>Acabado:</b>	Acero negro y galvanizado



Designación	Dimensiones				Masa Kg/m	A cm <sup>2</sup>	d1 cm	Momento de inercia		Módulo resistente		Radio de giro	
	h	b	c	e				ix	iy	Wx	Wy	ix	iy
	mm	mm	mm	mm				cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm
G 60x30x10x2	60	30	10	2	1,96	2,54	1,44	14,88	5,28	4,9	2,74	2,42	1,44
G 80x40x15x2	80	40	15	2	2,75	3,54	1,46	35,25	8,07	8,81	3,18	3,16	1,51
G 80x40x15x3	80	40	15	3	3,95	5,11	1,46	49,04	10,85	12,26	4,27	3,1	1,46
G 80x50x15x2	80	50	15	2	3,06	3,88	1,46	41,11	13,55	10,28	4,34	3,23	1,88
G100x50x15x2	100	50	15	2	3,38	4,34	1,73	69,24	14,98	13,85	4,57	4,00	1,86
G100x50x15x3	100	50	15	3	4,89	6,31	1,72	97,78	20,51	19,56	6,25	3,94	1,8
G100x50x15x4	100	50	15	4	6,29	8,15	1,71	122,5	24,85	24,49	7,55	3,88	1,75
G100x50x20x4	100	50	20	4	6,60	8,55	1,85	126,7	28,5	25,34	9,05	3,85	1,83
G100x50x25x5	100	50	25	5	8,35	10,86	1,98	152,51	36,52	30,5	12,09	3,75	1,83
G125x50x15x2	125	50	15	2	3,77	4,84	1,56	116,4	16,16	18,63	4,69	4,91	1,83
G125x50x15x3	125	50	15	3	5,48	7,06	1,55	165,5	22,16	26,48	6,43	4,84	1,77
G125x50x15x4	125	50	15	4	7,07	9,15	1,54	208,7	26,88	33,39	7,78	4,78	1,71

Figura 80 Viga estructural G100x50x15x3 [29].

### Especificaciones Generales:

- **Calidad:** ASTM A-500
- **Recubrimiento:** Negro o Galvanizado
- **Largo Normal:** 6.00 m
- **Otros Largos:** Previa Consulta
- **Dimensiones:** Desde 20.00mm a 100.00mm
- **Espesor:** Desde 1.20mm a 5.00mm

Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	I cm <sup>3</sup>
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94

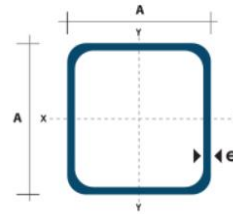


Figura 81 Tubo cuadrado estructural 50x2 [29].

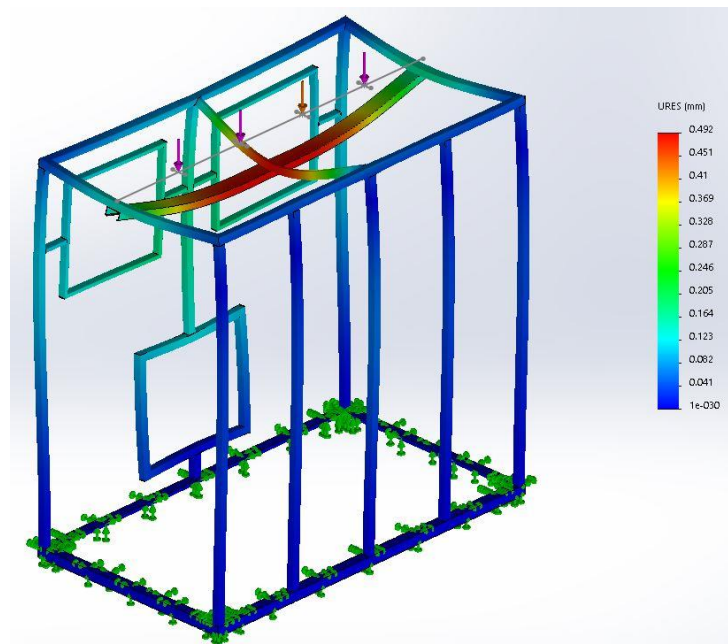
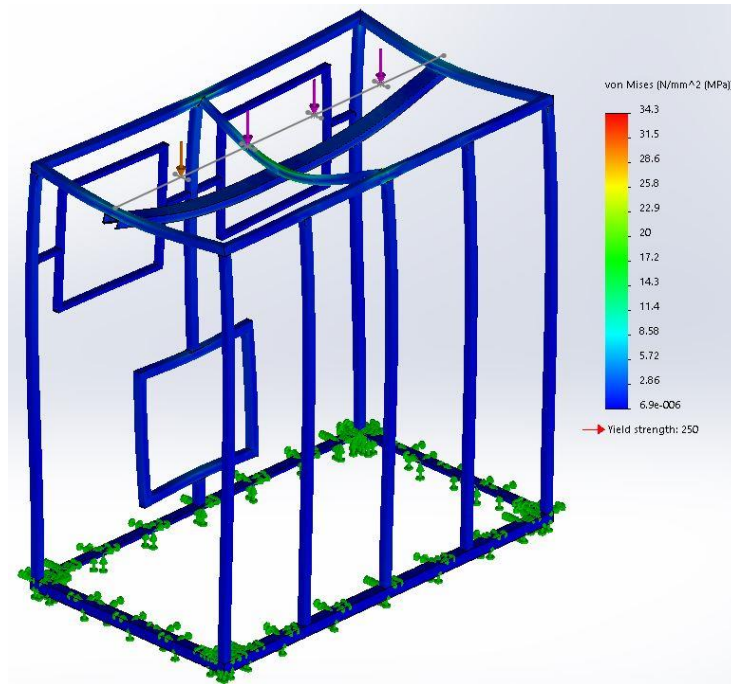


Figura 82 Desplazamiento Estructura Cabina.

Fuente: Autores.



*Figura 83 Esfuerzos Estructura Cabina.*

*Fuente: Autores.*

Finalmente se determina el factor de seguridad, utilizando la Ecuación 65.

$$F_s = \frac{Yield\ Strength}{Max\ Von\ Mises} = \frac{250MPa}{39.3MPa} = 6.361$$

El factor de seguridad resultante es mayor a 1.6, por lo tanto se cumple la condición, pero a su vez es un valor elevado, esto se debe a que las dimensiones internadas de la viga superior de la estructura, no se pueden reducir, ya que dentro de esta se debe acoplar un sistema de guiado y movimiento para los soportes que sostienen a los conjuntos de carretillas (Figura 84), como también el ancho del perfil que conforma la estructura para las paredes debe tener una medida fija de 50mm, este es el espesor del panel aislante seleccionado anteriormente; por lo tanto se puede decir que existe un factor de seguridad admisible.

A más de esto, es necesario verificar que el desplazamiento máximo sea menor a uno [28], en la Figura 82, se puede observar que el desplazamiento máximo es 0.492mm, por lo tanto, cumple la condición.



*Figura 84 Soporte - Guía.*

*Fuente: Autores.*

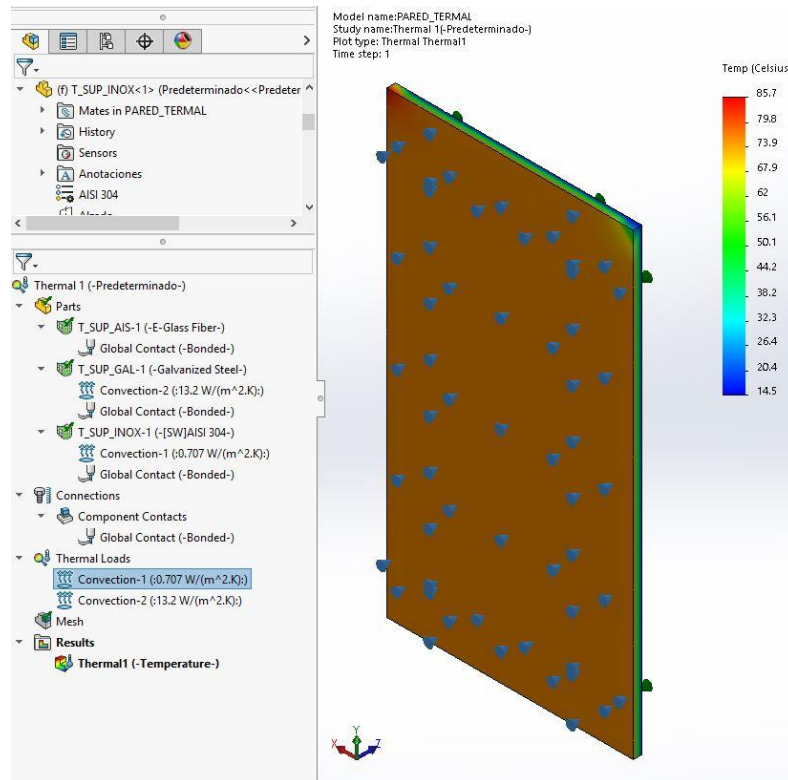
### **5.1.13 Simulación del sistema**

Una vez culminado el diseño completo del sistema, se procede a realizar una serie de simulaciones adicionales, en este punto se tienen todas las variantes que intervienen dentro del sistema y sus valores, este proceso es necesario para determinar si se requiere modificar algún parámetro dentro del diseño del sistema.

Este proceso es de gran importancia, porque se puede corregir los parámetros necesarios antes de realizar la construcción e implementación del sistema; para esto se utilizó SOLIDWORKS SIMULATION, y SOLIDWORKS FLOW SIMULATION.

Como primera simulación se realizó una de las paredes de la cabina de curado, para determina la temperatura T4, es la temperatura en la superficie externa de la pared, será comparada con la temperatura T4 obtenida en la fase de diseño; se puede observar en la Figura 85.





*Figura 85 Análisis térmico pared.*

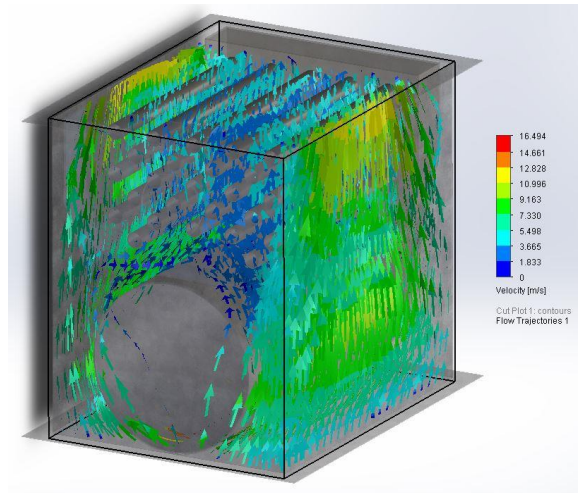
*Fuente: Autores.*

Ingresando los valores de temperatura, los valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección, y las propiedades físicas de los materiales determinados anteriormente, se obtiene una temperatura superficial en la superficie externa de la pared de 14.5°C, como se puede observar en la Figura 85.

En la fase de diseño se obtuvo una temperatura T4 de 17.211°C, por lo tanto, entre el valor analítico y el valor de la simulación existe una diferencia de 2.711°C; se puede decir que existe una diferencia aceptable, existiendo una diferencia de temperatura menor a los 5°C.

A continuación, se realizó la simulación del intercambiador de calor ensamblado en su hogar, para este análisis se estableció un flujo de ingreso de aire, y a su vez aplicando el valor de Q generado por el intercambiador de calor en el arreglo de tubos y en la cámara de combustión, todos estos valores se los obtiene en el apartado de diseño del intercambiador de calor.

En la Figura 86 se puede observar las velocidades que se generan dentro de este sistema.

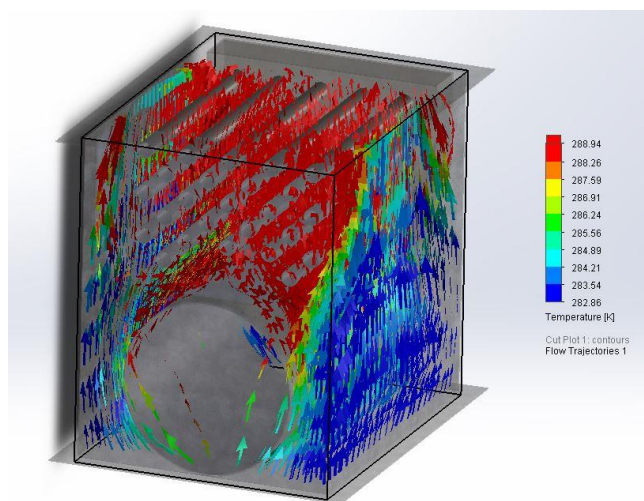


**Figura 86** Velocidades Intercambiador Calor.

**Fuente:** Autores.

Como se puede observar en la Figura 86, existe una velocidad máxima por el arreglo de tubos de 12.828m/s, en el apartado del diseño del intercambiador de calor se obtuvo un rango de velocidades por el arreglo de tubos igual a 4.77m/s - 20.042m/s, por lo tanto, el valor de velocidad por el arreglo de tubos obtenido en la simulación se encuentra dentro de este rango de velocidades.

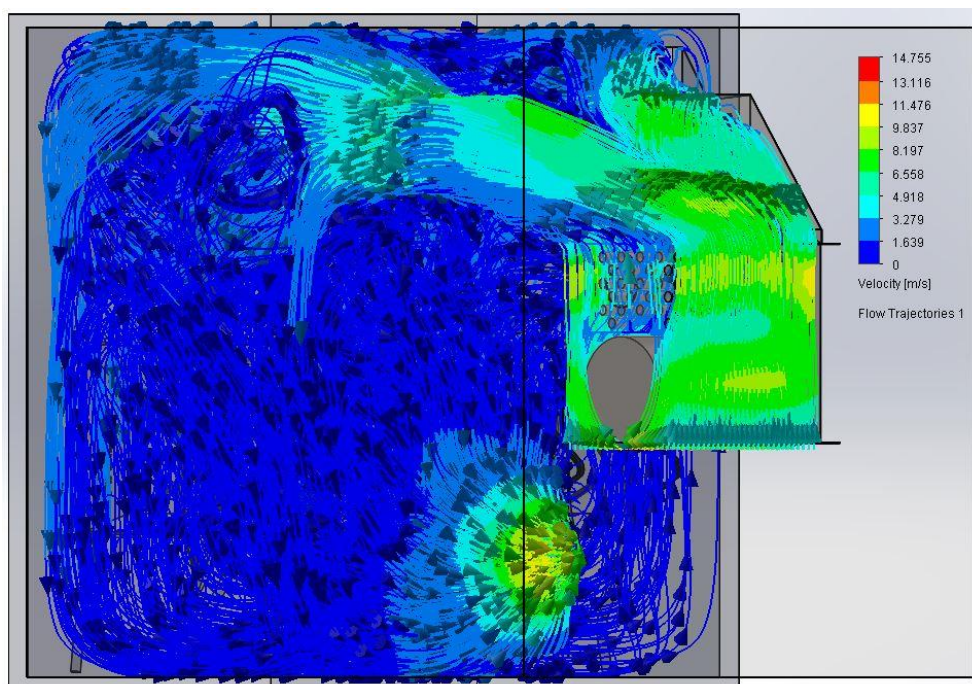
En la Figura 87, se observa cómo se genera la distribución de calor a lo largo del intercambiador de calor, antes que el flujo salga del sistema se genera una distribución de calor uniforme hacia el flujo de aire, por lo tanto, se puede decir que el diseño del sistema es adecuado, ya que, la temperatura del fluido se homogeneiza a la salida del intercambiador de calor.



**Figura 87** Flujo Intercambiador Calor.

**Fuente:** Autores.

Finalmente se realizó la simulación del flujo dentro del sistema completo, en la Figura 88 se aprecia que existe una distribución óptima del fluido al interior de la cabina de curado, al interior del intercambiador de calor y al interior de los ductos; pues existe un estancamiento del flujo de aire reducido y a su vez las velocidades al interior de la cabina son menores a 2m/s como recomienda la bibliografía estudiada en un inicio; y, al interior del intercambiador de calor las velocidades por el arreglo de tubos se mantiene dentro del rango de 4.77m/s - 20.042m/s; todos los valores necesarios para la simulación del sistema se obtuvieron del diseño analítico realizado anteriormente.



*Figura 88 Horno Curado Pintura Electroestática.*

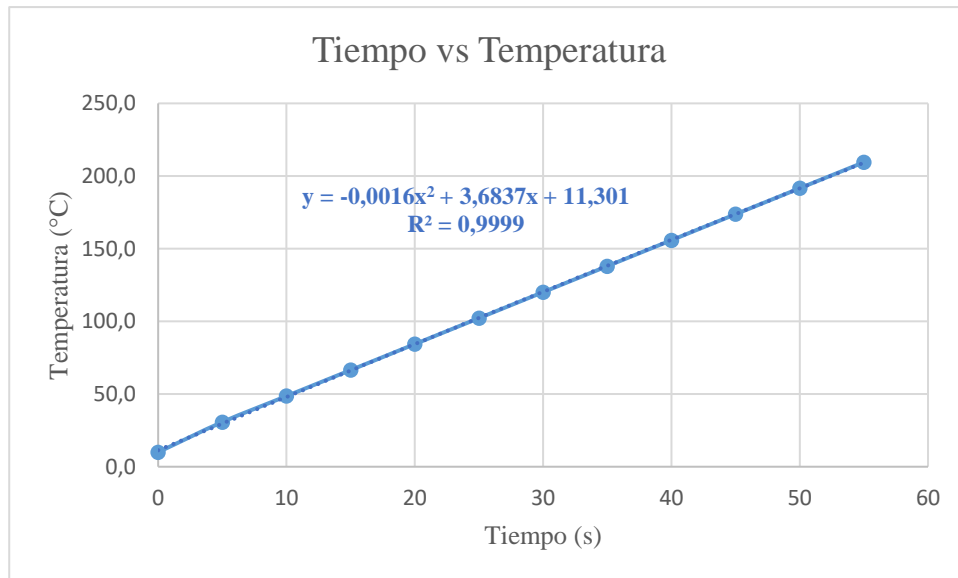
*Fuente: Autores.*

A más de esto se realizó una simulación dependiente del tiempo, para determinar cuál es el tiempo de calentamiento resultante para todo el volumen del fluido a una temperatura de 210°C, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8, y la Figura 89.

*Tabla 8 Tiempo de calentamiento 1.*

<b>SIMULACIÓN 1</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>0</b>	13,0
<b>5</b>	30,7
<b>10</b>	48,6
<b>15</b>	66,5
<b>20</b>	84,4
<b>25</b>	102,2
<b>30</b>	120,1
<b>35</b>	138,0
<b>40</b>	155,9
<b>45</b>	173,7
<b>50</b>	191,6
<b>55</b>	209,5
<b>Potencia Quemador 150KBtu/h</b>	

*Fuente: Autores.*



*Figura 89 Tiempo de calentamiento 1.*

*Fuente: Autores.*

Como resultado se tiene un tiempo de calentamiento de 55 minutos para alcanzar una temperatura de 210°C. A comparación del tiempo de calentamiento determinado en la fase de diseño igual a 17 minutos existe una diferencia considerable, realizando un análisis minucioso de los resultados obtenidos en la simulación como también del proceso de diseño realizado anteriormente, se pudo identificar las causas que provocan este tiempo de calentamiento elevado.

Las causas que provocan este tiempo de calentamiento son las siguientes:

- La Ecuación 14 utilizada para determinar el tiempo de calentamiento en la fase de diseño contempla solamente el volumen de la carga y el volumen de fluido que interviene dentro del sistema, por lo tanto, el conjunto de ductos y el intercambiador no intervienen; esto no quiere decir que la ecuación este mal aplicada, para realizar el proceso de diseño del sistema es necesario tener un tiempo de calentamiento definido en base a la carga a calentar, y justamente esta ecuación está definida para trabajar con estos parámetros; por lo tanto, se puede decir que esta ecuación proporciona un tiempo referencial de calentamiento, que puede variar significativamente por el número de componentes que complementan el sistema.
- Según la bibliografía estudiada en un inicio, los ductos de los sistemas no constan con ningún tipo de pared aislante que genera una pérdida de energía en el transcurso del flujo de aire por los ductos, esto ocasiona que la temperatura del fluido se vea afectada en cada ciclo de recirculación dentro del sistema, por lo tanto, para la construcción del sistema, se realizará un recubrimiento con paneles de fibra de vidrio sobre el conjunto de ductos.

Finalmente, en base a estos parámetros se recalculó el valor de la potencia de operación para el quemador, que debe estar dentro de los rangos operacionales, para este proceso se utilizó la Ecuación 14 considerando el intercambiador y los ductos que conforman el sistema completo.

En base a este resultado obtener un nuevo valor de potencia operacional para el quemador. Una vez realizado este proceso utilizando las ecuaciones necesarias definidas en el proceso de diseño, se obtuvo un tiempo de calentamiento de 33 minutos con una potencia operacional de 187000Btu/h para el quemador.

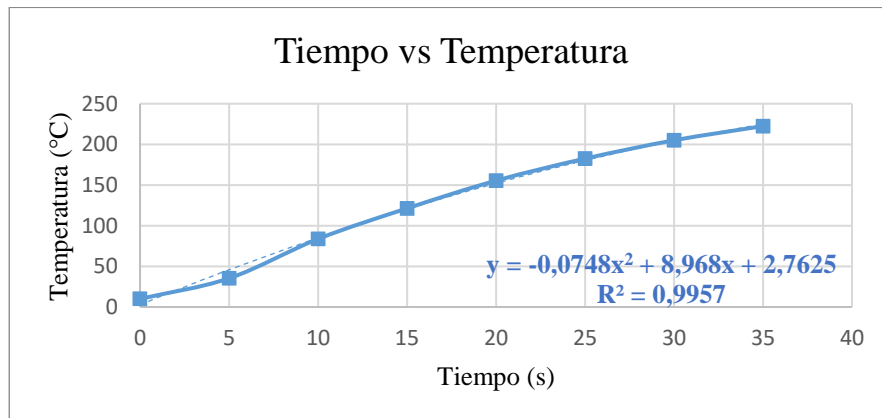
El tiempo de 33 minutos es admisible, el tiempo requerido para completar los 8 ciclos de producción mencionados en los puntos desarrollados en secciones anteriores, este nuevo valor se obtiene un valor resultante de 7.5 horas, así se puede culminar con todos los ciclos de curado en una jornada laboral de 8 horas.

Posteriormente se realizó una nueva simulación considerando la nueva potencia operacional del quemador. En la Tabla 6 y Figura 90 se puede observar los resultados tras la simulación del sistema.

**Tabla 9** Tiempo de calentamiento 2.

<b>SIMULACION 2</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>0</b>	10
<b>5</b>	35,3
<b>10</b>	83,7
<b>15</b>	121,3
<b>20</b>	155,4
<b>25</b>	182,5
<b>30</b>	205
<b>35</b>	222,5
<b>Potencia Quemador 187KBtu/h</b>	

*Fuente: Autores.*



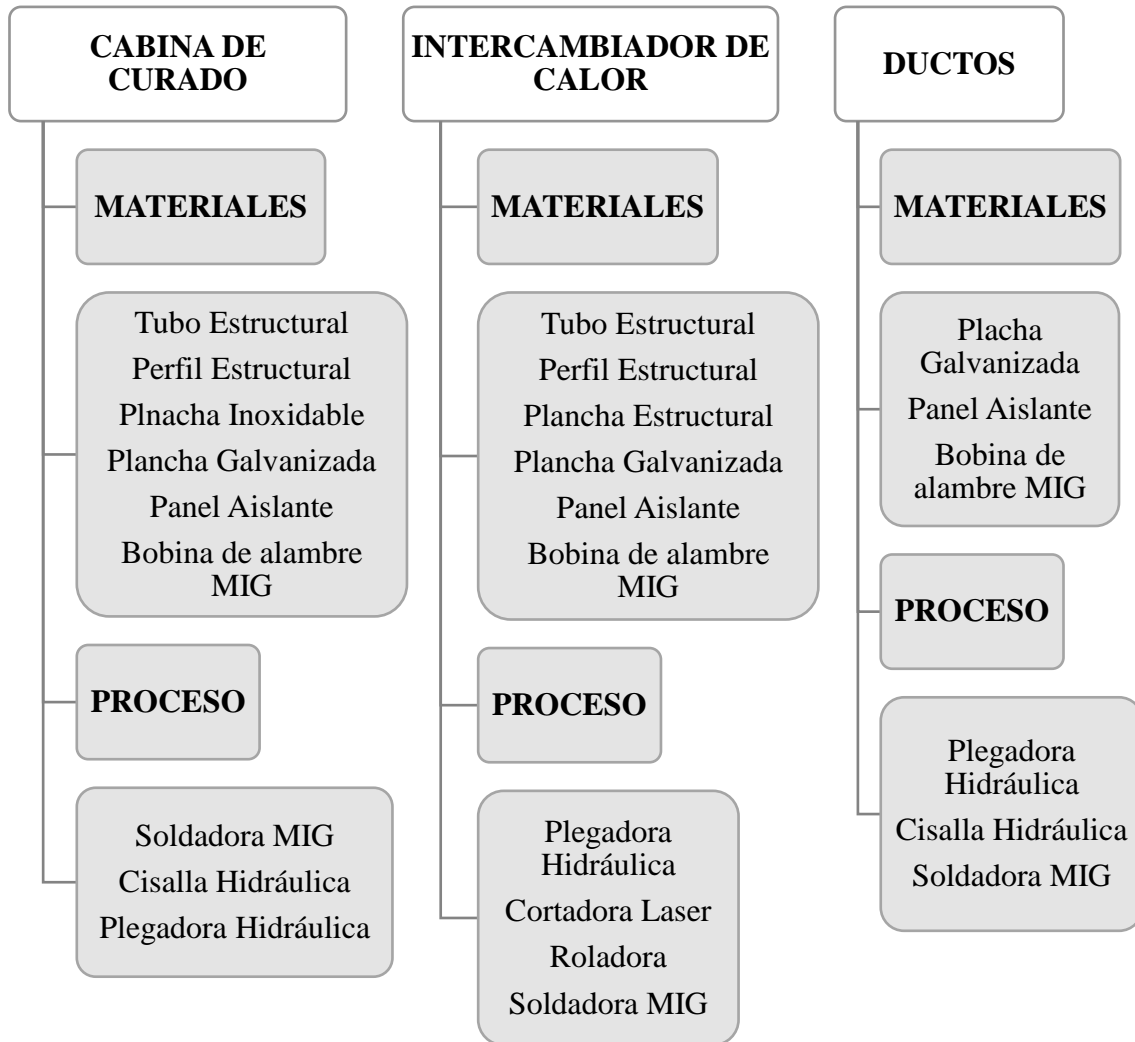
**Figura 90** Tiempo de calentamiento 2.

*Fuente: Autores.*

Como se puede observar en la Tabla 6 y Figura 90 el tiempo de calentamiento para alcanzar una temperatura de 210°C es de 31 minutos, entre el valor calculado y el simulado existe un error del 6.061%. Al tener un error menor al 10% se puede decir que los valores obtenidos son admisibles, a continuación, se procederá con la construcción del sistema.

## 5.2 Construcción del Horno de curado para pintura electrostática

### HORNO DE CURADO PARA PINTURA ELECTROSTÁTICA



*Figura 91* Esquema proceso de fabricación.

*Fuente:* Autores.

En el presente punto, se explicará en un orden cronológico el proceso de construcción del sistema en su totalidad, para esto se utilizó como base el esquema mostrado en la Figura 91 donde se especifica los subconjuntos que lo conforman, así como los materiales y equipos necesarios para la fabricación.

### 5.2.1 Construcción de la cabina de curado

Como primer paso se realiza la estructura de la cabina de curado, como se puede observar en la (Figura 92, y Figura 93).



*Figura 92 Estructura Cabina de Curado.*

*Fuente: Autores.*

A continuación, se procede a realizar el corte y doblado de las láminas que van a conformar las paredes de la cabina de curado. Como se observa en la Figura 93, para esto se utilizó una prensa hidráulica.



*Figura 93 Doblado de lámina.*

*Fuente: Autores.*



Una vez ensamblada la estructura, y las paredes internas de la cabina de curado, se procede con la aplicación de la pared aislante sobre las distintas superficies, como se observa en las Figura 94 y 95.



*Figura 94 Estructura Cabina de Curado final.*

*Fuente: Autores.*



*Figura 95 Aplicación pared aislante.*

*Fuente: Autores.*



*Figura 96* Aplicación pared aislante.

*Fuente:* Autores.

### **5.2.2 Construcción Ductos**

Posteriormente, se realiza la construcción de los ductos que conectan el intercambiador de calor con la cabina de curado y también las campanas que van instaladas en la cabina de curado, como se puede observar en las figuras 97, 98 y 99.



*Figura 97* Ductos de distribución.

*Fuente:* Autores.



*Figura 98 Campana.*

*Fuente: Autores.*



*Figura 99 Cabina de curado, ductos, y campanas.*

*Fuente: Autores.*

### 5.2.3 Construcción del intercambiador de Calor

A continuación, se procede a realizar la construcción del intercambiador de calor, (Figura 100), y a su vez la carcasa que lo contiene, que se puede observar en la Figura 101, las paredes de la carcasa del intercambiador tienen la misma configuración de la cabina de curado.



*Figura 100 Intercambiador de Calor.*

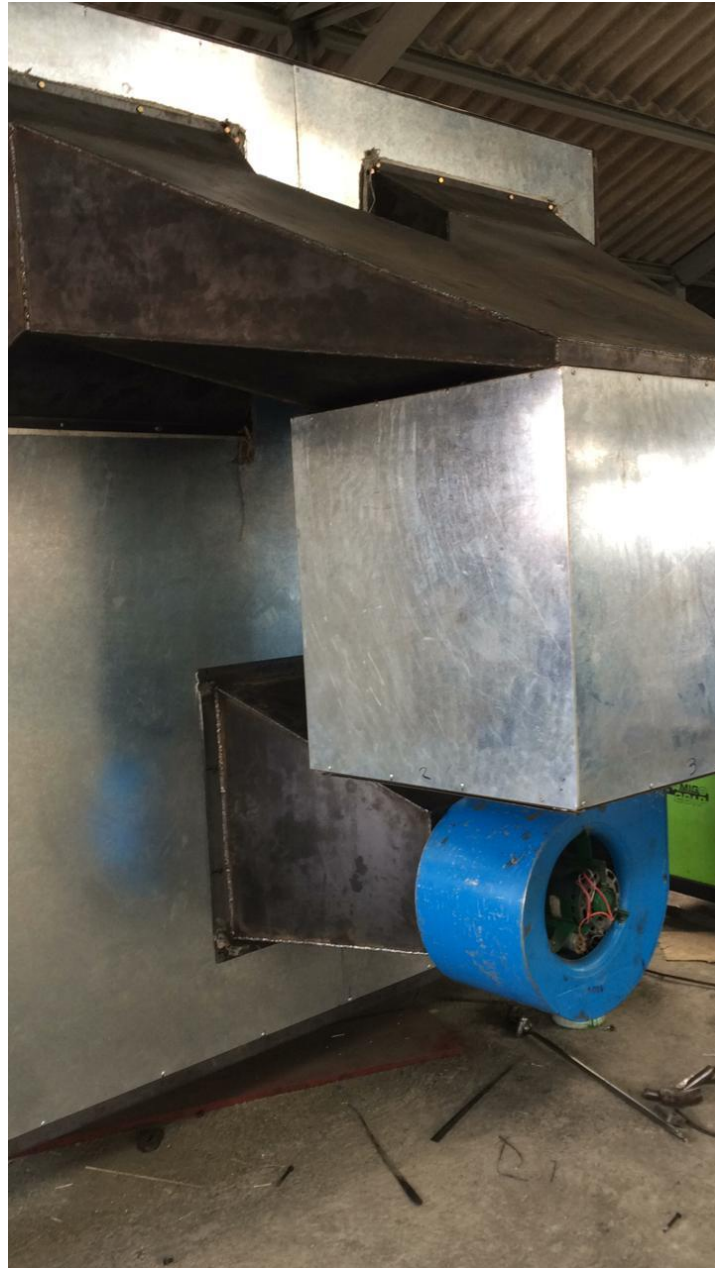
*Fuente: Autores.*



*Figura 101 Carcasa Intercambiador de Calor.*

*Fuente: Autores.*

Finalmente, se obtiene el sistema completamente ensamblado como se puede observar en la Figura 102.



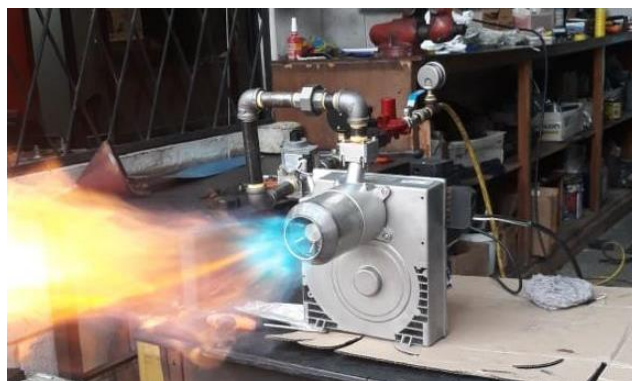
**Figura 102** Horno de curado para pintura electrostática.

**Fuente:** Autores.

### 5.3 Implementación del Horno de curado para pintura electrostática

Para la implementación del Horno de curado para pintura electrostática, es necesaria una instalación para el sistema de combustible GLP, y de igual forma realizar la instalación del sistema de control de temperatura.

Como primer paso se realiza la instalación del sistema de combustible GLP, para esto la empresa que distribuye el quemador realiza la implementación del sistema en su totalidad, basándose en la potencia requerida por el quemador, que se determinó anteriormente, y también en el rango de potencia de operación del quemador. Para realizar la instalación total de este sistema se requiere de los componentes descritos en la Tabla 10, esta configuración asegura cumplir con las regulaciones planteadas en la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 260:2010 [10]. El sistema de combustible GLP se lo puede observar en la Figura 103 y Figura 104.



*Figura 103 Sistema combustible GLP.*

*Fuente: Autores.*

*Tabla 10 Componentes Sistema GLP y Quemador*

*Fuente: Autores.*

<b>COMPONENTES SISTEMA DE GLP Y QUEMADOR</b>	
<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>1</b>	VÁLVULA REGULADORA REGO 3403 TR
<b>1</b>	VÁLVULA REGULADORA 2DA ETAPA REGO 3403 B4
<b>1</b>	CENTRALINA ITALIANA
<b>4</b>	LLAVES DE PASO ATAQUE RÁPIDO
<b>1</b>	LLAVE DE PASO
<b>4</b>	ACOPLES
<b>1</b>	QUEMADOR BALTUR ITALIANO TBG 11 DE 35KW 4 91KW DE BAJAS EMISIONES NORMA EUROPEA EN676 CON PROGRAMADOR SIEMENS ALEMÁN



*Figura 104 Sistema combustible GLP Acoplado.*

*Fuente: Autores.*

Para realizar el control de la temperatura, se optó por utilizar un control on – off, este es el control más adecuado para este tipo de aplicaciones, dando una variación de temperatura es muy lenta. Una vez se haya llegado a la temperatura deseada dentro del sistema; el quemador RIELLO consta con un programador SIEMENS integrado, por lo tanto, se requiere añadir los componentes que se muestran en la Tabla 11, que va a comandar tanto la activación y desactivación del quemador, como el encendido y apagado del ventilador centrífugo.

La caja de control que se muestra en la Figura 105 y Figura 106, al ser activada, se cumple la siguiente secuencia: 1) Alcanzar una temperatura de 210°C, 2) Mantener la temperatura por 11 minutos, y 3) Mantener un tiempo de enfriamiento de 15 minutos. Esta secuencia está basada en los parámetros de diseño del sistema. El control de temperatura se encarga de encender y apagar tanto el quemador como el ventilador centrífugo, las veces necesarias para cumplir la secuencia mencionada.

La termocupla se ubicó al centro del techo de la cabina de curado, se optó por esta opción, pues, como se mencionó anteriormente al observar la Figura 73, el flujo de aire al interior de la cabina de curado tiene una distribución uniforme, no existe estancamiento del fluido, tampoco no se generan vórtices, y a más de esto constructivamente es más factible ubicar la termocupla en la parte superior.



*Figura 105 Caja de control.*

*Fuente: Autores.*



*Figura 106 Instalación interna caja de control.*

*Fuente: Autores.*



**Tabla 11** Componentes Sistema Control.

*Fuente:* Autores.

<b>COMPONETES SISTEMA DE CONTROL</b>	
<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>1</b>	CLAVIJA LEGRAND 3P+T 16A 415V IP44
<b>1</b>	TOMA SOBREPUESTO LEGRAND 16A 3P+T 415V IP 44
<b>8</b>	MANGUERA BX FLEX 1/2"
<b>1</b>	CINTA 3M 20Y NEGRA/AZUL/COLORES
<b>20</b>	TERMINAL CERRADO 14-16 AZUL 5/16 2-8
<b>6</b>	CONECTOR BX 1/2"
<b>2</b>	CAJETIN OCTAGONAL METALICO GRANDE INDUMA
<b>2</b>	TAPA METAL OCTAGONAL GRANDE
<b>1</b>	TERMOCUPLA PT100 300C -50/+420 GRADOS CENTIG. C/ROSCA 60MM
<b>50</b>	CABLE ULTRAFLEX#14 CONELSA THHN
<b>15</b>	CABLE FLEXIBLE #18 TFN CONELSA
<b>7</b>	CABLE CONCENTRICO 3X14 SJT 2 CAPAS CONELSA
<b>2</b>	PRENSA ESTOPA CAMSCO PG11 HUECO 18.6MM-
<b>1</b>	ABRAZADERAS, TACOS FISHER, TORNILLOS, AMARRAS, CINTA
<b>1</b>	GABINETE METALICO PESADO 700X500X300 IP 64
<b>1</b>	CONTACTOR CHINT 2P 40A 220V NCH8
<b>1</b>	BREAKER RIEL LS 2P 40A
<b>1</b>	TEMPORIZADOR SEMANAL CAMSCO 30 AMP C/BAT 240V
<b>1</b>	LUZ PILOTO CAMSCO 22MM LED VERDE 220V
<b>1</b>	SELECTOR CAMSCO 22MM 2 POSC PLAST
<b>1</b>	BORNERA CAMSCO 1P 90 AMP P/RIEL
<b>1</b>	CABLE FLEXIBLE #18 TFN CONELSA
<b>1</b>	CABLE ULTRAFLEX#12 CONELSA THHN
<b>1</b>	CANALETA RANURADA GRIS 60X40 2MT
<b>1</b>	RIEL DIN LEIPOLE x 1m

#### 5.4 Análisis técnico financiero

En el presente punto, se pretende establecer los costos de construcción e implementación del sistema en su totalidad, para esto se realizó la Tabla 9, Tabla 12, Tabla 13, y Tabla 14; donde se desglosan los valores unitarios de todos los componentes y la mano de obra que intervienen para la realización del presente sistema.

*Tabla 12 Análisis Costos Unitarios Cabina Curado.*

*Fuente: Autores.*

<b>PROYECTO: Horno de curado para pintura electrostática</b>					
<b>ÁNÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS</b>					
<b>NOMBRE DEL OFERENTE:</b>					
<b>PROYECTO: Horno de curado para pintura electrostática</b>					
<b>ITEM:</b>	<b>1</b>				
<b>DESCRIPCION:</b>	<i>Cabina Curado</i>				
<b>UNIDAD:</b>	<b>U</b>				
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>					
<b>DESCRIPCION</b>		<b>CANTIDAD A</b>	<b>TARIFA HORA B</b>	<b>RENDIMIENTO HORAS/U C</b>	<b>COSTO TOTAL D=A*B*C</b>
Herramienta menor (Taladro, brocas, llaves de boca, dados, etc.)		3%MO			32,64
Plegadora Hidráulica		1	2,00	25	50,00
Cizalla Hidráulica		1	0,80	40	32,00
Soldadora		1	15,00	60	900,00
				<b>PARCIAL M</b>	<b>1014,64</b>
<b>MATERIALES</b>					
<b>DESCRIPCION</b>		<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD A</b>	<b>PRECI/U</b>	<b>COSTO TOTAL C=A*B</b>
Tubo Estructural Cuadrado 2in*2mm		U	7,00	15,5	108,50
Tubo redondo 3/4" 2mm		U	1,00	7,01	7,01
Tubo rectangular 2x1" 1.2		U	4,00	9,45	37,80
Perfil Estructural Tipo G 150*50*15*3mm		U	1,00	28,33	28,33
Plancha Acero Inoxidable		U	16,00	32	512,00
Plancha Acero Galvanizado		U	16,00	58,33	933,28
Panel Aislante Insulik		U	9,00	44,8	403,20

Alambre para MIG		U	1,00	21,21	21,21
Sistema de puertas		U	2,00	115	230,00
				<b>PARCIAL N</b>	<b>2281,33</b>
<b>TRANSPORTE</b>					
<b>DESCRIPCION</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD A</b>	<b>TARIFA/U B</b>	<b>DISTANCIA C</b>	<b>COSTO TOTAL D=A*B* C</b>
Camión Cuenca	U	5	5,00	1	25,00
				<b>PARCIAL O</b>	<b>25,00</b>
<b>MANO DE OBRA</b>					
<b>DESCRIPCION</b>		<b>CANTIDAD A</b>	<b>S.R.H. B</b>	<b>RENDIMIE NTO HORAS/U</b>	<b>COSTO TOTAL D=A*B* C</b>
Ayudante Mecánico		1	3,22	160	515,20
Ingeniero Mecánico		1	3,58	160	572,80
				<b>PARCIAL P</b>	<b>1088,00</b>
<b>TOTAL, COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)</b>					<b>4408,97</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDAD</b>				20,00%	881,79
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO</b>					
<b>VALOR PROPUESTO</b>					<b>5290,76</b>

*Tabla 13 Análisis Costos Unitarios Intercambiador Calor.*

*Fuente: Autores.*

<b>ÁNÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS</b>					
<b>NOMBRE DEL OFERENTE:</b>					
<b>PROYECTO: Horno de curado para pintura electrostática</b>					
<b>ITEM:</b>	<b>2</b>				
<b>DESCRIPCION:</b>	<i>Intercambiador Calor</i>				
<b>UNIDAD:</b>	<b>U</b>				
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>					
<b>DESCRIPCION</b>		<b>CANTIDAD A</b>	<b>TARIFA HORA B</b>	<b>RENDIMIENT O HORAS/U C</b>	<b>COSTO TOTAL D=A*B* C</b>
Herramienta menor (Taladro, brocas, llaves de boca, dados, etc.)		3%MO			8,16
Corte Laser		1	19,60	8	156,80
Rolado		1	7,00	4	28,00
Plegadora Hidráulica		1	3,00	10	30,00

Soldadora		1	15,00	15	225,00
				<b>PARCIAL M</b>	<b>447,96</b>
<b>MATERIALES</b>					
DESCRIPCION		<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDA D A</b>	<b>PRECI/U</b>	<b>COSTO TOTAL C=A*B</b>
Quemador+accesorios+instalación		U	1	1748,91	1748,91
Panel Aislante Insulik		U	1	44,8	44,80
Pernos M10x30		U	36	0,47	16,92
Ventilador		U	1	336	336,00
Plancha 2mm		U	2	53,76	107,52
Tubo sin costura 1 1/4"		U	3	39,2	117,60
Plancha 5mm		U	2	20	40,00
Alambre para MIG		U	0,20	21,21	4,24
				<b>PARCIAL N</b>	<b>2415,99</b>
<b>TRANSPORTE</b>					
DESCRIPCION	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD A</b>	<b>TARIFA/U B</b>	<b>DISTANCIA C</b>	<b>COSTO TOTAL D=A*B* C</b>
Camión Cuenca	U	5	5,00	1	25,00
				<b>PARCIAL O</b>	<b>25,00</b>
<b>MANO DE OBRA</b>					
DESCRIPCION		<b>CANTIDAD A</b>	<b>S.R.H. B</b>	<b>RENDIMIEN T O HORAS/U</b>	<b>COSTO TOTAL D=A*B* C</b>
Ayudante Mecánico		1	3,22	40	128,80
Ingeniero Mecánico		1	3,58	40	143,20
				<b>PARCIAL P</b>	<b>272,00</b>
<b>TOTAL, COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)</b>					<b>3160,95</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDAD</b>				20,00%	632,19
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO</b>					
<b>VALOR PROPUESTO</b>					<b>3793,14</b>

Tabla 14 Análisis Costos Unitarios Ductos.

Fuente: Autores.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
NOMBRE DEL OFERENTE:					
PROYECTO: Horno de curado para pintura electrostática					
ITEM:	3				
DESCRIPCION:	Ductos				
UNIDAD:	U				
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
DESCRIPCION		CANTIDAD A	TARIFA HORA B	RENDIMIENTO HORAS/U C	COSTO TOTAL D=A*B*C
Herramienta menor (Taladro, brocas, llaves de boca, dados, etc.)		3%MO			4,08
Soldadora		1	15,00	5	75,00
Plegadora Hidráulica		1	2,00	4	8,00
Cizalla Hidráulica		1	0,80	25	20,00
				<b>PARCIAL M</b>	<b>107,08</b>
MATERIALES					
DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIU	COSTO TOTAL C=A*B
Plancha 2mm		U	3,00	53,76	161,28
Pernos M8X75		U	60,00	0,41	24,60
Alambre para MIG		U	0,20	21,24	4,25
				<b>PARCIAL N</b>	<b>190,13</b>
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA/U B	DISTANCIA C	COSTO TOTAL D=A*B*C
Camión Cuenca	U	2	5,00	1	10,00
				<b>PARCIAL O</b>	<b>10,00</b>
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION		CANTIDAD A	S.R.H. B	RENDIMIENTO HORAS/U	COSTO TOTAL D=A*B*C
Ayudante Mecánico		1	3,22	20	64,40
Ingeniero Mecánico		1	3,58	20	71,60
				<b>PARCIAL P</b>	<b>136,00</b>

<b>TOTAL, COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)</b>					<b>443,21</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDAD</b>				20,00%	88,64
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO</b>					
<b>VALOR PROPUESTO</b>					<b>531,85</b>

*Tabla 15 Análisis Costos Unitarios Totales.*

*Fuente: Autores.*

<b>ANÁLISIS DE COSTOS TOTALES</b>					
<b><i>PROYECTO: Horno de curado para pintura electrostática</i></b>					
<b>Fecha:</b>					
<b>N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unid.</b>	<b>Cantidad</b>	<b>P. Unitario</b>	<b>P. Total</b>
<b>1</b>	Cabina Curado	U	1	5290,76	5290,76
<b>2</b>	Intercambiador Calor	U	1	3793,14	3793,14
<b>3</b>	Ductos	U	1	531,85	531,85
				<b>TOTAL</b>	<b>9615,76</b>

Como se puede apreciar en la Tabla 15, el costo total del sistema tiene un valor de \$9615.76; donde \$5290.76 es el costo total de la cabina de curado, \$3793.14 es el costo total del intercambiador de calor y \$531.85 es el costo total de los ductos. El desarrollo del presente punto es de gran importancia ya que se determina el costo real para la realización del horno de curado para pintura electrostática en su totalidad.

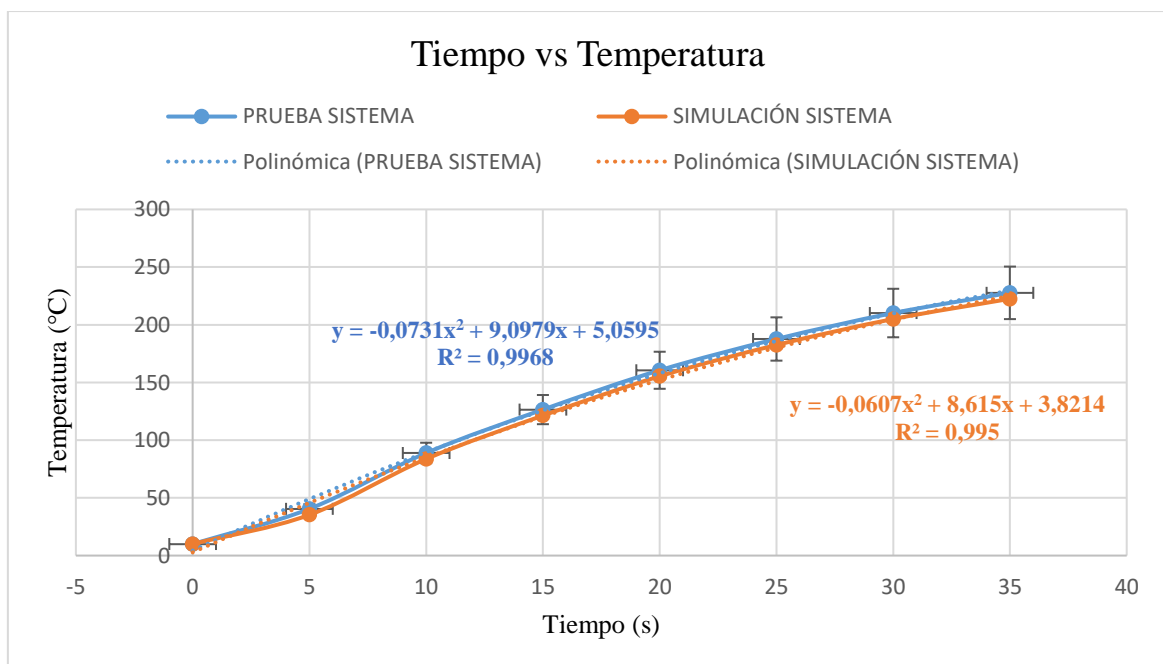
## 5.5 Pruebas y Resultados

Una vez finalizada la construcción e implementación del horno de curado para pintura electrostática, se procedió a realizar un total de cinco pruebas al sistema con la carga total dentro de la cabina de curado, los resultados obtenidos tras estas pruebas se los puede observar en la Tabla 16 y Figura 107; en la Tabla 13 se detallan los tiempos promedios del sistema, los tiempos obtenidos tras la simulación del sistema, y finalmente se muestra el error promedio total.

**Tabla 16** Resultados Prueba Sistema y Simulación.

*Fuente:* Autores.

PRUEBA SISTEMA		SIMULACIÓN SISTEMA		ERROR
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	
0	10	0	10	0,0
5	40,5	5	35,3	12,8
10	88,9	10	83,7	5,8
15	126,5	15	121,3	4,1
20	160,6	20	155,4	3,2
25	187,7	25	182,5	2,8
30	210,2	30	205	2,5
35	227,7	35	222,5	2,3
Potencia Quemador 187KBtu/h		Potencia Quemador 187KBtu/h		4,2



**Figura 107** Curva Prueba Sistema y Simulación.

*Fuente:* Autores.

Realizando un análisis de los valores mostrados en la Tabla 16, se puede decir que los valores obtenidos en la simulación del sistema con respecto a los valores obtenidos tras las pruebas de funcionamiento del sistema son admisibles, se obtuvo un error promedio total del 4.2% que es menor al valor admisible del 10% recomendado por la literatura estudiada.

En la Figura 107 se puede apreciar tanto la curva obtenida tras la realización de las pruebas al sistema como la curva obtenida tras la simulación, se puede observar que los valores obtenidos tras la simulación del sistema se encuentran dentro del rango de la desviación estándar; por lo tanto, el sistema está diseñado adecuadamente en base a los requerimientos planteados.

Todas las pruebas realizadas al sistema se las efectuó en horas de la mañana, las mismas se deben realizar a una temperatura ambiente crítica cercana a los 10°C como se mencionó en las condiciones de diseño. Al realizar las pruebas en estas condiciones se asegura que el sistema puede funcionar de una forma adecuada a la temperatura, por lo tanto a temperaturas mayores no se genera ninguna complicación con el funcionamiento del sistema; a más de esto es necesario mencionar que la caja de control implementada al sistema, funciona de una manera adecuada, y la misma controla adecuadamente el encendido y apagado del quemador y del ventilador centrífugo, la variable del tiempo y la temperatura del fluido al interior del sistema.



## **6 Conclusiones**

### **Conclusión Específica 1**

Carretillas Eterna es un producto con gran aceptación en el mercado de la zona austral, sin embargo, para garantizar e incrementar sus ventas a nivel nacional requiere dar un valor agregado al producto, para esto, es necesario mejorar aspectos como acabado y resistencia de la pintura, por lo tanto, se opta por un sistema de pintura electrostático con cabina de curado, proceso que es menos contaminante, confiable y con costos competitivos en el mercado.

### **Conclusión Específica 2**

El diseño del horno de curado para pintura electrostática regenerativo considera una cabina de curado, un intercambiador de calor de tubos y carcasa, y de un conjunto de tubos, con esta configuración se asegura una temperatura operacional de  $210^{\circ}\text{C}$  al interior de la cabina de curado; la configuración de las paredes aseguran una temperatura superficial externa igual a  $17.22^{\circ}\text{C}$  este valor es idóneo y no genera ningún problema para el operador al momento de manipular las puertas, por lo tanto se puede decir que al existir una diferencia de  $7.22^{\circ}\text{C}$  con respecto a la temperatura ambiente crítica de  $10^{\circ}\text{C}$  la diferencia de temperatura es admisible; El intercambiador de calor proporciona una potencia operacional de  $187000\text{Btu/h}$  para cumplir con la producción semanal de la empresa que es de 128 carretillas con un tiempo de calentamiento igual a 30 minutos en una jornada laboral de 8 horas. Los ductos que conectan la cabina de curado con el intercambiador de calor son recubiertos con paneles aislantes y de esta forma evitar que las variaciones de temperatura externas afecten de una manera significativa a la temperatura del fluido interno que recorre el arreglo de ductos; Las paredes de la cabina de curado tienen la siguiente configuración: una pared interna de acero inoxidable AISI 304 de 1mm de espesor, un panel aislante intermedia de cincuenta milímetros de espesor con un coeficiente de transferencia de calor igual a  $0.081\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ , y de una pared externa de acero galvanizado ASTM A653 de un milímetro de espesor. Los datos calculados se validan con el software SolidWorks, que determina que el proceso de diseño es eficiente y cumple con las variables establecidas.

### **Conclusión Específica 3**

Ya que las geometrías que conforman los distintos componentes no tienen gran complejidad de manufactura, la construcción del horno para pintura electrostática se lo realiza utilizando máquinas y herramientas convencionales; todos los materiales y accesorios necesarios para la construcción e implementación del sistema son adquiridos a nivel nacional. El horno en fase de operación alcanza una temperatura máxima de 220 °C en un tiempo de 30min, y mantiene la temperatura con una variación de  $\pm 5$ . Las pérdidas de calor generadas son mínimas, entonces el aislamiento térmico escogido cumple a cabalidad con los datos establecidos. El quemador y el intercambiador de calor trabajan con una eficiencia del 80%, que permite establecer que todo el sistema es eficiente y tiene una variación mínima del 5% con los datos calculados. Después de realizadas las pruebas operacionales, se determina que el sistema es fiable en condiciones reales, cumpliendo con las condiciones planteadas en el diseño.

### **Conclusión Específica 4**

El horno de curado para pintura electrostática tiene un costo total de \$9615.76, el equipo funcionalmente cumple con todos los requerimientos operacionales para realizar el curado de la pintura electrostática poliéster; se concluye con certeza que su construcción es viable, sistemas con características operacionales similares dentro del mercado tienen un precio de venta que oscila entre \$12000 y \$15000.

## **7 Recomendaciones**

Previo al diseño del sistema es de gran importancia determinar todas las variables físicas y operacionales que van a intervenir dentro del sistema.

Se debe priorizar el uso de los materiales, componentes, y equipos que se pueden adquirir a nivel provincial y nacional, de esto depende directamente el tiempo necesario para realizar la construcción como la implementación del sistema.

Para la realización de las distintas simulaciones del sistema, es necesario disponer de los valores resultantes de las distintas variables que intervienen, y a su vez verificar que las unidades requeridas por el software de ingeniería a utilizar sean las correctas.

Es importante llevar un registro de los valores obtenidos tanto en las pruebas del sistema como en el proceso de simulación, así es mucho más fácil generar las distintas curvas de resultados, como también sus curvas de tendencia, y su desviación estándar.

Con respecto a la parte constructiva, es necesario contar con los planos necesarios para de esta forma reducir el número de errores constructivos, también es necesario solicitar la información necesaria a los distribuidores de los distintos componentes que intervienen dentro del sistema y así realizar una implementación correcta.

## 8 Referencias

- [1] C. D. Art, «Cosmos Digital Art,» 2018. [En línea]. Available: <https://cosmosdigitalart.com/aerografos/>. [Último acceso: 3 Febrero 2019].
- [2] p. para, «pintura para,» pintura para, 17 Julio 2016. [En línea]. Available: <https://www.pintura-para.com/pintura-electrostatica/>. [Último acceso: 03 Febrero 2019].
- [3] D. M. E. HERRAMIENTAS, «DE MAQUINAS E HERRAMIENTAS,» DE MAQUINAS E HERRAMIENTAS, 24 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/intro-pistola-de-pintar>. [Último acceso: 3 Febrero 2019].
- [4] N. P. Excellence, «NETZSCH Proven Excellence,» NETZSCH Proven Excellence, 2019. [En línea]. Available: <https://www.netzsch-grinding.com/es/industria-quimica/pintura/recubrimiento-por-inmersion-catodico/>. [Último acceso: 03 Febrero 2019].
- [5] W. PINTURAS, «WESCO PINTURAS,» WESCO PINTURAS, 2019. [En línea]. Available: <http://www.pinturaswesco.com>. [Último acceso: 03 Febrero 2019].
- [6] B. A. G. H. GUSTAVO DAVID CARRILLO CAMACHO, «DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA EL CURADO DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E SEDE LATACUNGA,» Sangolquí, 2010.
- [7] Francescutti, 2007.
- [8] W. Trinks, INDUSTRIAL FURNACES, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [9] Y. A. ÇENGEL, TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Un enfoque práctico, México, D.F.: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2007.
- [10] I. E. D. NORMALIZACIÓN, *INSTALACIONES DE GASES COMBUSTIBLES PARA USO RESIDENCIAL, COMERCIAL E INDUSTRIAL. REQUISITOS.*, Quito: INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2010.
- [11] O. A. Jaramillo, «INTERCAMBIADORES DE CALOR,» México, 2007.
- [12] J. M. C. YUNUS A. ÇENGEL, MECÁNICA DE FLUIDOS Fundamentos y aplicaciones, México: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2006.
- [13] A. G. Association, «Rendimiento de Productos de Acero Galvanizado en Caliente,» American Galvanizers Association, Colorado, 2015.
- [14] NOAA, «National Centers for Environmental Information,» National Centers for Environmental Information, 2019. [En línea]. Available: <https://www.ncdc.noaa.gov>. [Último acceso: Abril 2019].
- [15] F. ISOVER, *FICHA TÉCNICA FIBERGLASS ISOVER*, Colombia: FIBERGLASS ISOVER, 2018.

- [16] C. EduPack, «CES EduPack,» Granta Desing Limited, Cambridge, 2013.
- [17] I. E. D. NORMALIZACIÓN, *NORMA DE EMISIONES AL AIRE DESDE FUENTES DE COMBUSTION*, Quito: INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2019.
- [18] GREET, « Regulated Emissions, and Energy Use In Transportation Model,» The Greenhouse Gases, IL, 2010.
- [19] M. Lage, *Gas natural (GNC / GNL) vs. Gas Licuado de Petróleo (GLP) Datos comparativos.*, Barcelona: GASNAM, 2014.
- [20] J. C. ELICER, *ELEMENTOS DE COMBUSTION*, 2018.
- [21] M. A. B. YUNUS A ÇENGEL, *Termodinámica*, México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2009.
- [22] RIELLO, *GULLIVER BSF SERIES*, RIELLO, 2019.
- [23] E. ToolBox, «Engineering ToolBox,» Engineering ToolBox, 2018. [En línea]. Available: [https://www.engineeringtoolbox.com/Propane-C3H8-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d\\_2064.html](https://www.engineeringtoolbox.com/Propane-C3H8-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d_2064.html). [Último acceso: 14 Mayo 2019].
- [24] E. ToolBox, «The Engineering ToolBox,» Engineering ToolBox, 2003. [En línea]. Available: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html). [Último acceso: 10 Mayo 2019].
- [25] WAYNE, *WAYNE Combustion Systems*, Indiana: WAYNE, 2019.
- [26] A. C. o. G. Industrial, *Industrial Ventilation Manual*, Washington: American Conference of Governmental Industrial , 2010.
- [27] Anzola, *CENTRÍFUGOS Serie BP-BP.t*, Guayaquil: Anzola, 2019.
- [28] R. D. M. Beer, *Mecánica De Materiales*, México, D. F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2010.
- [29] DIPAC, «DIPAC,» DIPAC, 1 Mayo 2019. [En línea]. Available: <http://www.dipacmanta.com>. [Último acceso: 1 Mayo 2019].

## 9 Anexos