



ING. MECATRÓNICA

**Tesis previa a la obtención del título de
Ingeniero en Mecatrónica.**

AUTOR: Ing. Nelson Muñoz

TUTOR: Ing. Jonathan Castro

Diseño de una cabina de pintura automatizada para la
empresa Rosso Motors

DECLARACIÓN

Yo Nelson Gustavo Muñoz Arteaga, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.



Nelson Gustavo Muñoz Arteaga

C.I. 172226907-1

CERTIFICACIÓN

El docente de la Facultad de Ciencias Técnicas, escuela de Ingeniería Mecatrónica Ingeniero Jonathan Castro encargado de la revisión del documento final, CERTIFICA QUE: El proyecto de investigación denominado "Diseño de una cabina de pintura automatizada para la empresa Rosso Motors", fue desarrollado por el Sr. Nelson Gustavo Muñoz Arteaga y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

Ing. Jonathan Castro
DIRECTOR DE PROYECTO

Dedico este trabajo a mi abuelo y mi padre, que me cuidan y protegen desde el cielo. Y a mi madre que ha sido un pilar para mi hermana y para mí, sin ella no podría estar hoy aquí.

Agradecimientos

Primero quiero agradecer a mi familia que siempre me apoyo en todos mis proyectos y en mi vida, a mi madre y mi hermana Liz. Mi padre, que, aunque ya no está conmigo siempre ha sido mi admiración y mi ejemplo a seguir. A mi tutor Jonathan Castro, que sin él no hubiera podido sacar este proyecto final, gracias a que me acompañó durante todo este tiempo y en general a todos mis profesores, ya que me dieron las enseñanzas y aprendizajes que hoy en día tengo.

A la empresa Rosso Motors, por permitirme y prestarme su equipo de trabajo y sus espacios, sobre todo al Ing. Paladines, que se convirtió en mi mentor y en un gran ejemplo. A todos mis compañeros de la universidad, a mis abuelas y a Vanessa, que también me ayudó en este trabajo final. Todas estas personas forman parte de mi trabajo y esto lo hice con ellos y para ellos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Tema	1
2	Objetivos	1
	2.1 General	1
	2.2 Específicos	1
3	Problema	1
4	Hipótesis	2
5	Mecanismos de transferencia de calor	2
	5.1 Conducción	3
	5.2 Convección	3
	5.3 Radiación	3
6	Tipos de quemadores en una cabina de pintura	4
7	Tipos de cabinas de pintura	6
8	Trabajos existentes	7
9	Selección de alternativas	9
	9.1 Matriz de prioridad	10
10	Proceso de pintura automotriz	11
11	Diseño de la cabina de pintura	14
	11.1 Diseño mecánico	15
	11.1.1 Sistema de ventilación	15
	11.1.2 Caudal de aire necesario en la cabina	15
	11.1.3 Selección de ventiladores	16
	11.1.4 Diseño de los ductos de ventilación	18
	11.1.5 Transferencia de calor de los quemadores	20
	11.1.6 Pérdida de calor a través del techo y las paredes	24

11.1.7	Sistema de iluminación	47
11.1.8	Estructura de la cabina	51
11.1.9	Análisis de factores de diseño en la estructura	51
11.1.10	Diseño de las rejillas de la cabina de pintura	56
11.2	Diseño electrónico	59
11.2.1	Cálculo eléctrico sistema de iluminación	60
11.2.2	Cálculo eléctrico sistema de ventilación	61
11.2.3	Cálculo eléctrico sistema de control	62
11.2.4	Cálculo eléctrico sistema de calentadores	65
11.2.5	Elección del tamaño del cable para cada etapa.	67
11.3	Programación	68
11.3.1	Diagrama de flujo de la cabina de pintura	68
11.3.2	Interfaz gráfica	70
12	Construcción	70
13	Pruebas y Resultados	73
13.1	Prueba de consumo	73
13.2	Prueba de calentadores	74
13.3	Aumento de temperatura de los calentadores	76
13.4	Distribución de calor en la pieza	78
13.5	Tiempo de secado	79
14	Análisis de costos	79
15	Conclusiones y Recomendaciones	82

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Ventilador	17
2	Perdidas de fricción en ductos	19
3	Ángulo solido	22
4	Composición de la pared	25
5	Distribución de la cabina	28
6	Pared izquierda	28
7	Pared derecha	34
8	Pared posterior	37
9	Pared delantera	40
10	Estructura del techo de la cabina	51
11	Esfuerzos obtenidos	53
12	Centro de gravedad en una camioneta	56
13	Análisis viga	57
14	Diagrama de cortante	58
15	Diagrama de momento	58
16	Foco utilizado	60
17	Max6675 y termocupla tipo K	64
18	Resistencias en paralelo	65
19	Rele seleccionado	66
20	Amperaje que soportan los cables de cobre	68
21	Diagrama de flujo	69
22	Interfaz gráfica	70
23	Cabina inicial	71
24	Instalación de quemadores	71

25	Instalación de ventiladores y techo	72
26	Caja de control	72
27	Cabina final	73
28	Amperaje en la línea	74
29	Temperatura maxima alcanzada por cada lampara	75
30	Temperatura vs tiempo	77
31	Distribucion de calor por una pieza	78

ÍNDICE DE TABLAS

1	Tipos de quemadores	5
2	Tipos de cabina de pintura	6
2	Tipos de cabina de pintura	7
3	Trabajos Existentes	8
4	Alternativas de Diseño	10
5	Alternativas de Materiales	11
6	Mezclas de pintura comunmente utilizadas	12
6	Mezclas de pintura comunmente utilizadas	13
6	Mezclas de pintura comunmente utilizadas	14
7	Ficha técnica del ventilador	17
8	Conductividad termica k	25
9	Propiedades del aire a la presión de 1atm	26
10	Índice del local	48
11	Factor de utilización	49
12	Constantes físicas de materiales	55
13	Selección del controlador para el proceso	62
13	Selección del controlador para el proceso	63
14	Resumen del consumo eléctrico	67
15	Mediciones calculadas	75
16	Mediciones con pistola infrarroja y error calculado	76
17	Temperatura vs tiempo	76
17	Temperatura vs tiempo	77
18	Tiempo de pintado	79
19	Costo total de los componentes de la cabina de pintura	80

19	Costo total de los componentes de la cabina de pintura	81
20	Ganancia por pieza de pintura	81

Cabina de pintura automotriz

1. Tema

Diseño de una cabina de pintura automatizada para la empresa Rosso Motors.

2. Objetivos

2.1. General

Diseñar una cabina de pintura automatizada para la empresa Rosso Motors.

2.2. Específicos

- Dimensionar los infrarrojos necesarios para poder llegar a una temperatura de 50 grados centígrados dentro de la cámara.
- Dimensionar el sistema de ventilación y filtrado de la cabina.
- Dimensionar la luz necesaria para una buena iluminación de la cabina de pintura.
- Diseñar el sistema de control, para las tres etapas necesarias de la pintura las cuales son pintado, horneado y secado.
- Acoplarse a la estructura ya establecida por la empresa para reducir costos de producción.

3. Problema

Rosso Motors es una empresa cuya actividad comercial se basa en la reparación y mantenimiento de vehículos livianos para diferentes entidades públicas y privadas. Haciendo un estudio de tiempos de producción a la empresa, se encontró que sería óptimo mejorar el área de pintura automotriz. Etapa en donde existe mayor cantidad de tiempos muertos y en donde se puede mejorar la calidad del producto final.

Durante el pintado de un vehículo es importante entender los diferentes subprocesos para tener un buen acabado en la pintura. Primero, cuando el carro está totalmente reparado y preparado, se lo fondea; esto quiere decir que se le da capas de pintura blanca o gris según sea el caso para que esto sirva como base. A continuación, se pone de dos a tres capas de pintura del color del carro que van a servir como protección. Finalmente, se da de dos a tres capas de barniz para proteger y dar brillo a la pintura.

La cabina de pintura a diseñarse deberá acoplarse al área de trabajo que ya tiene establecido la empresa. Además contará con una correcta renovación de aire, iluminación y tendrá que alcanzar una temperatura de 50 grados Celsius. Dichos factores son muy importantes y afectan al acabado final de la pintura.

4. Hipótesis

La cabina de pintura tendrá una estructura que se acople al área de trabajo que la empresa ya tiene implementada, en la parte electrónica se usará paneles infrarrojos para calentar la pintura del auto. Adicional, la cabina asegurará un correcto flujo de aire y garantizará una iluminación adecuada. Para su operatividad, se realizará el control con tres modos. En el primer modo se realizará el pintado. En esta etapa es necesario mantener la cabina a 20 grados y con ventilación continua. El segundo modo será el secado, en donde los paneles aumentarán su potencia para subir la temperatura del vehículo y se apagaran los ventiladores para que el ingreso del aire sea mínimo. Finalmente, se realiza la extracción del aire para que la cabina regrese a sus condiciones iniciales, para dar inicio a un nuevo ciclo.

5. Mecanismos de transferencia de calor

Es importante conocer algunas definiciones básicas y los mecanismos de transferencia de calor para comprender de mejor manera la elección de quemadores infrarrojos que haremos posteriormente. Primeramente, definiremos el calor como una forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro. Dicha transferencia de energía siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja y se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura, a esto se lo conoce

como equilibrio térmico. Existen tres tipos de transferencia de calor que se los describe a continuación.

5.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, esto se da como resultado de interacciones entre esas partículas. En los sólidos la conducción se da por la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. Por ejemplo, en la cabina se puede apreciar el efecto de la conducción en las paredes, ya que, internamente se encuentra a una temperatura y externamente a otra. Mientras mayor sea dicha diferencia de temperaturas mayor flujo de calor existirá y para disminuir dicho flujo de calor en algunos casos se requerirá del uso de un aislante térmico.

5.2. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Esto ocurre en las cabinas de pintura cuando el aire es forzado a entrar mediante los ventiladores con el objetivo de enfriar al automóvil. También se da en las cabinas con calentadores a diesel que hacen fluir el aire caliente por toda la cabina .

5.3. Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida y no sufre atenuación en un vacío. Sin embargo, la radiación

suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas. Esta consideración se la realiza porque las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos. Otra importante propiedad relativa a la radiación de una superficie es su absorptividad, la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por esta. En muchas aplicaciones prácticas, las temperaturas de la superficie y de la fuente de radiación incidente son del mismo orden de magnitud, y la absorptividad promedio de una superficie se considera igual a su emisividad promedio. La diferencia entre las razones de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. Si la razón de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación. Esto ocurre en nuestra cabina cuando las lámparas son las que emiten radiación y el automóvil será el que absorba esta energía.

6. Tipos de quemadores en una cabina de pintura

Después de conocer algunos conceptos básicos y los mecanismos de transferencia de calor, es fundamental conocer los principales tipos de quemadores usados en las cabinas de pintura. En el mercado ecuatoriano principalmente se usan cabinas con quemadores a diesel y con quemadores infrarrojos. En la tabla 1 se realiza una breve descripción de dichos quemadores.

Tabla 1: Tipos de quemadores

Alternativa	Imagen	Descripción
<p>Quemador de diésel M300S</p>		<p>Su funcionamiento se basa en calentar el aire dentro de la cabina por convección, y está diseñado para conseguir un alto rendimiento y una gran calidad de combustión. Su voltaje de funcionamiento es de 220 V [1].</p>
<p>Quemadores infrarrojos</p>		<p>Su funcionamiento se basa en calentar el material desde adentro hacia afuera por medio ondas electromagnéticas. Usando este método no se pierde energía en calentar el aire, sino que se enfocó toda la energía en el material. Su voltaje de funcionamiento es de 220V y tiene una potencia de 1kW por cada lampara. Además, es de fácil instalación.</p>

Los quemadores infrarrojos tienen muchas ventajas sobre el quemador de diésel. Por su fácil instalación. Sin embargo, la principal es su facilidad para enfocar la energía en el material y no en el aire, reduciendo así pérdidas de energía. También son bastantes seguros y reducen tiempos de secado, además de su bajo nivel de contaminación y fácil instalación.

7. Tipos de cabinas de pintura

Una cabina de pintura automotriz es un espacio en donde la iluminación, la renovación de aire y el tiempo de secado juegan un papel fundamental. Actualmente, se ha convertido en una herramienta primordial para el área de pintura automotriz en los talleres, debido a que reduce tiempos de producción y mejoran el acabado final. Es por esta razón, que existen diversos modelos en el mercado. Las cabinas de pintura se pueden clasificar según su forma de operación, por el tipo quemadores que utiliza y por el tipo de extracción del aire. En este caso nos enfocaremos por el tipo de extracción de aire debido a que nos interesa extraer la pintura de forma eficaz. En la tabla 2 se muestra una breve descripción de los tipos de cabinas de pintura según la forma de extracción del aire.

Tabla 2: Tipos de cabina de pintura

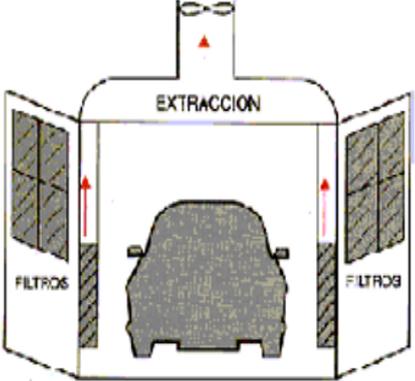
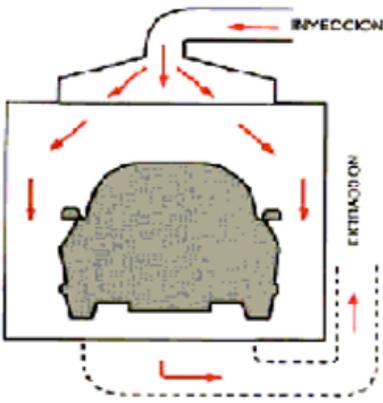
Tipos	Imagen	Descripción
Cabinas no presurizadas	 <p>El diagrama ilustra una cabina de pintura no presurizada. En el centro se encuentra un vehículo. Encima del vehículo, en la parte superior de la cabina, hay un punto de extracción etiquetado como 'EXTRACCION' con una flecha roja que apunta hacia arriba. A los lados de la cabina, hay filtros etiquetados como 'FILTROS'. Flechas rojas indican el flujo de aire que entra por los filtros laterales y sale por el punto de extracción superior.</p>	Este tipo de cabinas tiene solamente un punto de extracción que funciona con equipos de ventilación. El ingreso de aire se lo hace de manera natural por filtros colocados en diferentes partes de la cabina.

Tabla 2: Tipos de cabina de pintura

Tipos	Imagen	Descripción
Cabinas presurizadas		<p>A diferencia de la anterior tipo de cabina, este tipo de cabina cuenta con un sistema de sobre presión (ingresa más aire filtrado del que se extrae). Esto tiene como beneficio la eliminación de polvo y de otros contaminantes que pueden existir en el exterior. Por ende, este sistema es más utilizado que las cabinas no presurizadas. Es importante mencionar que dentro de este tipo de cabinas se encontrará modelos de circulación horizontal que inyecta aire por uno de los extremos y lo extrae por el otro. También está el modelo de circulación descendente que tiene como ventaja un mejor flujo de aire directo sobre el vehículo y disminución de las partículas de pintura que se encuentran en el resto de la cabina.</p>

8. Trabajos existentes

En la Tabla 3, se describen cabinas de pintura ya existentes en el mercado.

Tabla 3: Trabajos Existentes

Nombre	Descripción	Representación Gráfica
<p>Launch CCH-101</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Los paneles de la cabina son de chapa galvanizada y contiene un grosor de 0,376mm a 0,426mm, siendo estos aislados por poliestireno extruido prensado. ■ Este tipo de cabinas el Lunch Ibérica usa pintura y grupos de termo-ventilación, con ventiladores centrífugos con pala invertida de alta presión. ■ El quemador contiene una capacidad de 130.000kc/h, es de aire impulsado. ■ Dimensiones internas: 6.9 x 3.9 x 2.7m. 	

Nombre	Descripción	Representación Gráfica
LY8200	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dimensiones internas: 6840x3900x2600mm. ■ Los paneles de pared son de doble capa hecha con lengüeta y ranura con un espesor de 50mm. ■ Las luces de techo contienen ocho juegos de tres piezas teniendo un total de 36w. ■ Los ventiladores de entrada de aire son centrífugos. ■ Paneles endotérmicos de 33kW/h de potencia. 	 <p>The image shows a blue industrial spray booth. It has a control panel on the left side and a fan unit on top. The booth is labeled 'SoloStacks' in the top left corner. The booth has three doors on the right side and a control panel on the left side. The booth is made of blue panels with white trim.</p>

9. Selección de alternativas

De acuerdo con las características de los diferentes tipos de cabina de pintura. En la Tabla 4 se presentan algunas alternativas planteadas.

Tabla 4: Alternativas de Diseño

Alternativa	Descripción
Alternativa 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cambiar la estructura por un material aislante. ■ Calentamiento con paneles endotermicos. ■ Cabina presurizada. ■ Control de la cabina con PLC.
Alternativa 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mantener la estructura ya existente. ■ Calentamiento con paneles infrarrojos. ■ Cabina no presurizada. ■ Control de la cabina con Raspberry.

9.1. Matriz de prioridad

Se realiza una matriz de prioridad para respaldar la decisión del diseño tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Precio.
- Flujo de aire.
- Tiempo de implementación .
- Control de la cabina.

Cada opción tiene una puntuación de 1 a 5 por cada criterio, siendo 1 la puntuación más baja y 5 la más alta. Los resultados se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5: Alternativas de Materiales

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2
Precio	1	4
Flujo de aire	4	2
Tiempo de implementación	1	4
Control de la cabina	4	2
Total	10	12

Se selecciona la alternativa 2 ya que, ofrece las mejores cualidades de diseño para la cabina de pintura.

10. Proceso de pintura automotriz

El proceso de pintado automotriz es un trabajo que debe ser ejecutado por un personal con amplio conocimiento y experiencia. Además, los clientes buscan que la reparación sea imperceptible, esto tiene relación directa con el acabado en la pintura. Dicho proceso puede ser definido como el conjunto de productos aplicados en finas capas que forman un solo cuerpo, cuya función principal es la de proteger la carrocería del vehículo y darle un terminado y acabado superficial que resalte. Las capas de pintura son de dos tipos: pintura de fondo y pintura de acabado estas se aplican desde el interior al exterior respectivamente [2]. La buena calidad de la pintura dependerá de la mezcla de la pintura. Por ello es aconsejable usar todos los productos de la misma marca con el objetivo de obtener los mejores resultados. En la tabla 6 se muestra las mezclas más utilizadas en el taller.

Tabla 6: Mezclas de pintura comunmente utilizadas [3]

Tipo	Descripción	Cantidad necesaria de cada componente
Pintura de fondo	<p>Esta es la primera capa y se usa para dar un relleno base, además de dar uniformidad a la pieza que se va a trabajar. La mezcla se da entre el catalizador que en este caso es el UH200 y la pintura de fondo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mezcla: 4-1 (por cada cuatro gramos de pintura se utilizará un gramo de catalizador). ■ Aplicación : dos a tres manos en intervalos de cinco minutos. ■ Temperatura máxima: 70 grados Celsius ■ Tiempo de secado en cabina de pintura: 20 - 40 minutos
Pintura con brillo directo	<p>Esta pintura también se la conoce como monocapa, como su nombre lo indica, solo necesita de una capa para su aplicación. Con esta capa se tendrá como resultado el color, dureza y brillo para poder aplicar posteriormente la capa de barniz. Esta mezcla esta compuesto por la pintura y el reductor US6080.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mezcla: 4-1 (por cada 4 gramo de pintura se utilizará un gramo de reductor). ■ Aplicación : Una a tres manos. ■ Temperatura máxima: 60 grados Celsius ■ Tiempo de secado en cabina de pintura: 20 - 40 minutos

Tabla 6: Mezclas de pintura comunmente utilizadas [3]

Tipo	Descripción	Cantidad necesaria de cada componente
Pintura base	Esta pintura también se la conoce como bicapa, como su nombre lo indica se ponen dos capas de pintura. Esta mezcla esta compuesta por la pintura, pigmentos colorantes y resinas acrílicas que se las encuentran en los estabilizadores BCS600, BCS605 Y BCS608.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mezcla: 1-1 (por cada gramo de pintura se utilizará un gramo de estabilizador). ■ Aplicación : Una a tres manos en intervalos de cinco minutos. ■ Temperatura máxima: 60 grados Celsius ■ Tiempo de secado en cabina de pintura: 10 - 30 minutos

Tabla 6: Mezclas de pintura comunmente utilizadas [3]

Tipo	Descripción	Cantidad necesaria de cada componente
Barniz	Esta es la última capa que se le aplica a la pintura ya sea de brillo directo o pintura base. Esta capa sirve para lograr los acabados y también para proteger las demás capas, porque aporta una mayor resistencia y dureza. Está compuesto por barniz tipo CC930, catalizador UH904 y reductor US8095.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mezcla: 3-1 (por cada tres gramos de barniz se utilizará un gramo de catalizador y un 10 por ciento de reductor). ■ Aplicación : dos a tres manos en intervalos de cinco minutos. ■ Temperatura máxima: 60 grados Celsius ■ Tiempo de secado en cabina de pintura: 30 - 50 minutos

Es importante mencionar que antes de aplicar cualquier capa de pintura primero se debe limpiar la superficie con un solvente que sea limpiador y desengrasante, con la finalidad de eliminar grasas, aceites, polvillo, residuo de lija o cualquier tipo de material que pueda afectar la calidad de pintura.

11. Diseño de la cabina de pintura

Para el diseño de la cabina se ha dividido en tres secciones.

- Diseño mecánico
- Diseño electrónico
- Programación

11.1. Diseño mecánico

Como se mencionó anteriormente la empresa Rosso motors ya cuenta con un área establecida para la cabina de pintura. Las dimensiones son las siguientes: 4.16 metros de anchos, 7.12 metros de longitud y 2.8 metros de altura. Para organizar correctamente la etapa de diseño mecánico se han dividido en las siguientes subetapas que son:

- Sistema de ventilación
- Sistema de calentamiento
- Sistema de iluminación
- Estructura de la cabina

11.1.1. Sistema de ventilación

En el sistema de ventilación es muy importante considerar dos aspectos fundamentales, que son la seguridad del pintor y el factor mediambiental. Porque si no tiene una buena renovación de aire, las partículas de pintura pueden afectar a su salud. En cuanto al cuidado ambiental un buen filtrado ayuda a que se retengan la mayoría de las partículas de la cabina y así evitar que las mismas contaminen el ambiente. Cabe mencionar que, la empresa ya cuenta con dos ventiladores, por lo que, se verificará si estos cumplen los parámetros necesarios para el buen funcionamiento de la misma.

11.1.2. Caudal de aire necesario en la cabina

Para poder calcular el caudal de aire necesario en la cabina se aplica. (1), [4].

$$Q_{cab} = V_{cab} \cdot \frac{R}{H} \quad (1)$$

Donde:

Q_{cab} : Caudal de la cabina, en m³/h

V_{cab} : Volumen de la cabina, en m³

$\frac{R}{H}$: Renovaciones de aire por hora, en R/H.

Como se conoce las dimensiones de la cabina, ocupamos (2), para determinar el volumen de la cabina.

$$V_{cab} = l \cdot a \cdot h \quad (2)$$

Donde:

V_{cab} : Volumen de la cabina, en m^3

l : Largo de la cabina, en m

a : Ancho de la cabina, en m

h : Alto de la cabina, en m.

$$V_{cab} = 7,12m \cdot 4,16m \cdot 2,8m$$

$$V_{cab} = 82,93m^3$$

La cantidad de renovaciones de aire que son necesarias se puede obtener de las recomendaciones realizadas en la norma DIN 1946 [5], que nos indica que para una cabina de pintura se debe realizar 100 renovaciones de aire por hora. Con este dato ya se puede calcular el caudal de aire necesario.

$$Q_{cab} = 82,93m^3 \cdot 100h$$

$$Q_{cab} = 8293,38m^3/h$$

$$Q_{cab} = 2,30m^3/s$$

11.1.3. Selección de ventiladores

La empresa cuenta con dos ventiladores marca Power FC-100 como se muestra en la figura 1. De dicha ficha se obtuvieron los parámetros que se muestran en la tabla 7.



Figura 1: Ventilador

Tabla 7: Ficha técnica del ventilador [6]

Parámetro	Unidad
Voltaje de funcionamiento	110 v
Potencia	69 W
Flujo de aire nominal	1869 m ³ /h
Peso	9.7 lb

De la tabla se observa que los ventiladores de la empresa no son los adecuados para el volumen que tiene la cabina. Ya que cuentan con un flujo de aire nominal de 3738 metros cubicos sobre hora, mientras que la cabina necesita de 8293.38 metros cubicos sobre hora.

Utilizándolos solamente alcanzarían 45 renovaciones por hora, arriesgando así la salud del pintor. Se recomienda cambiar los ventiladores por unos que si cumplan los parámetros de diseño para una buena renovación de aire.

11.1.4. Diseño de los ductos de ventilación

Para dimensionar los ductos de la cabina hay que tomar en cuenta la pérdida de energía que existirá en este sistema . Las pérdidas más considerables son la pérdida por fricción que aparecen cuando el aire circula por secciones rectas y las pérdidas dinámicas que ocurren cuando el aire fluye por los diferentes conectores. Considerando que es recomendable que dentro de una cabina de pintura la velocidad del aire no exceda los 10 m/s [2]. Se adquirirá un valor de velocidad de 8 m/s como parámetro de diseño, dado que ya se conoce la rapidez de flujo o caudal. Se utilizará la figura 2, para determinar la pérdida por fricción y obtener el diámetro de los ductos.

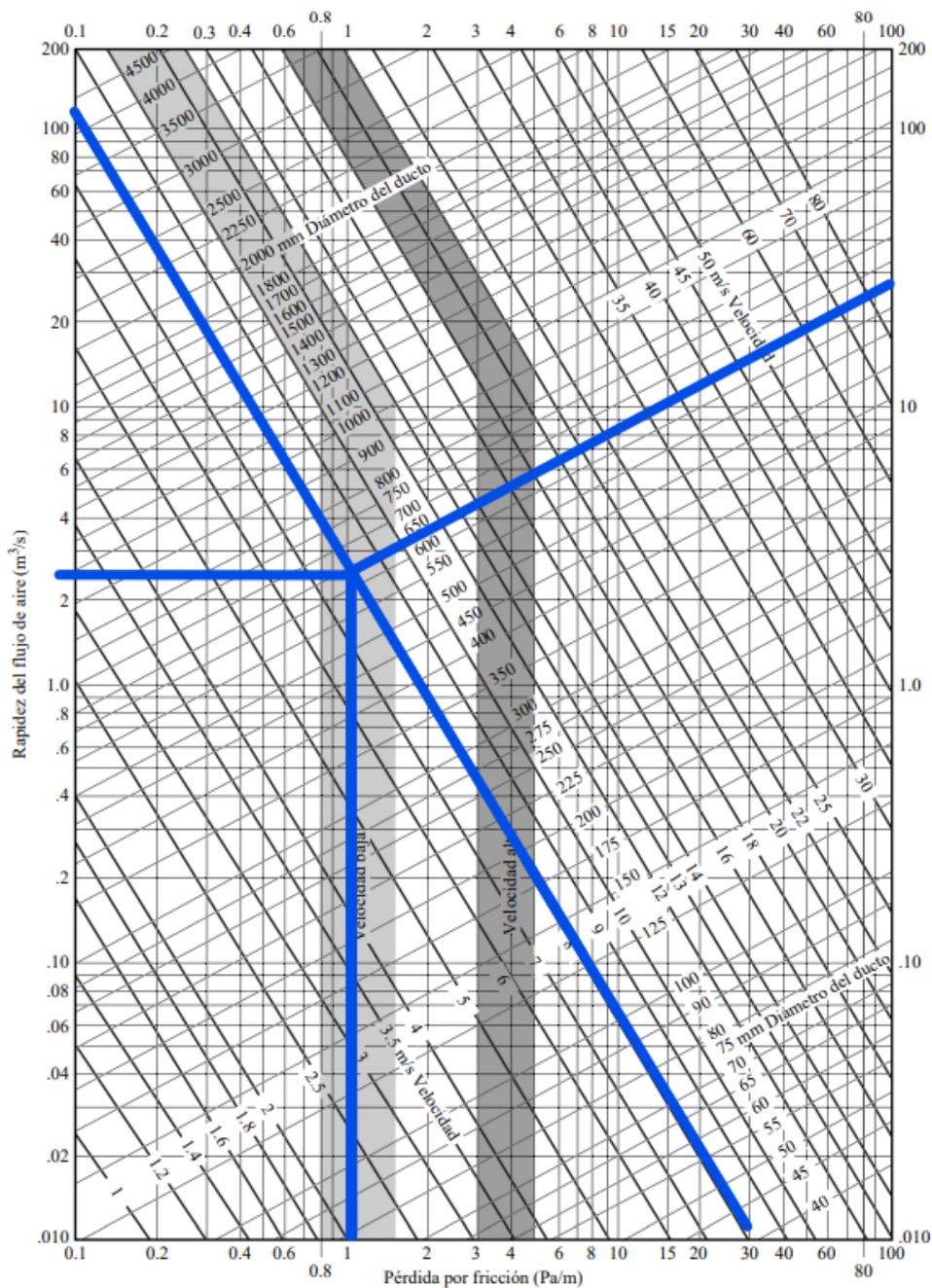


Figura 2: Pérdidas de fricción en ductos [7]

De la figura se obtiene que la pérdida por fricción va a hacer de 1 Pa/m. Sabiendo que el tubo de admisión y el tubo de salida de aire serán rectos sin ninguna conexión no se necesita considerar pérdidas dinámicas. También se obtiene el diámetro del ducto, a este valor hay que transformarlo para un tubo cuadrado dado por (3) [7].

$$D_e = \frac{1,3 \cdot (a \cdot b)^{\frac{5}{8}}}{(a + b)^{\frac{1}{4}}} \quad (3)$$

Donde:

D_e : Diámetro equivalente, en m

l : Largo del tubo cuadrado, en m

a : Ancho del tubo cuadrado, en m

Despejando de (3) y como es un tubo cuadrado a y b son iguales, entonces se tiene que el tubo cuadrado debe ser de:

$$a = b = 0,64\text{m}$$

11.1.5. Transferencia de calor de los quemadores

Las lámparas infrarrojas son fuentes térmicas que aumentan su temperatura por el paso de una corriente eléctrica. El filamento de estas lámparas convierte esta energía eléctrica y la transmite en forma de radiación, existiendo una relación directa entre la potencia y la transferencia de calor por radiación que viene dada por (4) [8]:

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (4)$$

Donde:

\dot{Q}_T : Transferencia de calor en W

ϵ : Emisividad

σ : Constante de Stefan-Boltzmann en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

A_s : Área de la superficie en m^2

T_s : Temperatura superficie en K

T_{alred} : Temperatura alrededor en K

La potencia de cada quemador la obtenemos de la tabla 1, la emisividad de la lámpara es de 0.89, la constante de Stefan-Boltzmann es igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$, sus dimensiones son de 2 cm de diámetro y 60 cm de largo, con esto podemos calcular el área que va a hacer igual a:

$$A_s = 2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot (0,01 + 0,6)$$

$$A_s = 0,038m^2$$

La temperatura ambiente la tenemos como dato y es de 18 grados Celsius o 291.15 Kelvin, teniendo todo los valores podemos calcular la temperatura a la que va a llegar la lámpara:

$$968 = 0,89 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,038 \cdot (T_s^4 - 291,15^4)$$

$$T_s = 842,907K$$

La temperatura que alcanzará la lámpara será de 842.907 Kelvin o 569.75 Celsius.

La radiación es emitida hacia todas las direcciones y va a depender de factores como la distancia y la posición del objeto para llegar a una cierta temperatura. La intensidad de radiación es una cantidad que describe la magnitud de la radiación emitida de un objeto a otro, para describir la dirección de la radiación en el espacio haremos uso de coordenadas esféricas. Donde según la posición y la distancia donde ubiquemos el área superficial, al unirlos desde el centro se formara un objeto tridimensional, al ángulo que está en el centro se lo conoce como ángulo sólido esto lo podemos observar en la figura 3.

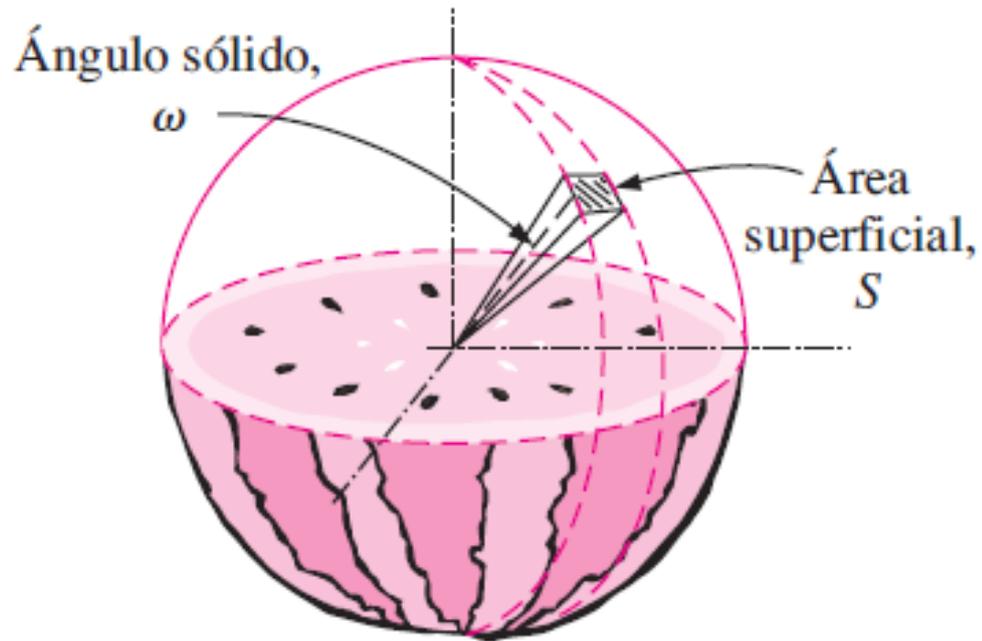


Figura 3: Ángulo solido [8]

Las superficies pequeñas a comparación de distancias grandes se pueden tratar como áreas diferenciales en los cálculos de los ángulos sólidos. El ángulo sólido para una superficie plana es igual a (5) :

$$\omega = \frac{A_n \cdot \cos(\theta_2)}{r^2} \quad (5)$$

Donde:

ω : Ángulo sólido en sr (estereorradián)

A_n : Superficie de la placa en m^2

r : Distancia o radio de la esfera en m^2

La intensidad emitida para superficies pequeñas viene dada por(6) :

$$I = \frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4}{\pi} \quad (6)$$

Donde:

T_1 : Temperatura del cuerpo que transmite calor en K

Finalmente tenemos que la razón emitida desde un cuerpo a otro viene dado por (7):

$$\dot{Q}_{1-2} = I \cdot A_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot \omega \quad (7)$$

Para una pieza que este ubicada perpendicularmente a 1 m de la lámpara y su superficie superficial sea de 4 cm² [8] se obtendria:

$$\omega_{1-2} = \frac{A_n \cdot \cos(\theta_2)}{r^2}$$

$$\omega_{1-2} = \frac{0,0004}{1^2}$$

$$\omega_{1-2} = 4 \times 10^{-4} \text{ sr}$$

$$I_{1-2} = \frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4}{\pi}$$

$$I_{1-2} = \frac{0,89 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 845,012^4}{\pi}$$

$$I_{1-2} = 8189,83 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$$

$$\dot{Q}_{1-2} = I \cdot A_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot \omega$$

$$\dot{Q}_{1-2} = 8189,83 \cdot 0,038 \cdot 4 \times 10^{-4}$$

$$\dot{Q}_{1-2} = 0,1244 \text{ W}$$

Aplicando la ecuación y conociendo la emisividad del acero que es igual a 0.52 (4):

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4)$$

$$0,1244 = 0,52 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,004 \cdot (T_s^4)$$

$$T_s = 320,47K$$

Una superficie que se encuentra perpendicularmente a un metro de distancia de una lámpara tendrá 47.32 grados centígrados. Se aprecia en las ecuaciones ya mostradas con anterioridad que el valor de θ_1 y θ_2 es de 0 porque el objeto esta de forma perpendicular. Si variamos este valor afectará la temperatura en el objeto.

11.1.6. Pérdida de calor a través del techo y las paredes

Para calcular la pérdida de calor por conducción en las paredes de la cabina se va a utilizar la temperatura ambiente promedio de 20 grados Celsius. Utilizando la ley de Fourier (8) de la conducción de calor se calcula la razón de pérdida de calor para cada pared.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (8)$$

Donde:

\dot{Q} : Calor perdido de la pared, en W

k : Conductividad térmica, en W/m · °C

A : Área de la pared, en m²

T_1 : Temperatura interior, en °C

T_2 : Temperatura exterior, en °C

L : Espesor de la pared, en m

Esta ecuación también se la puede expresar de la siguiente forma (9):

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (9)$$

Donde:

R : Suma de las resistencias en la pared, en K/W

La suma de resistencia representa la composición de la pared y se puede observar en la figura 4.

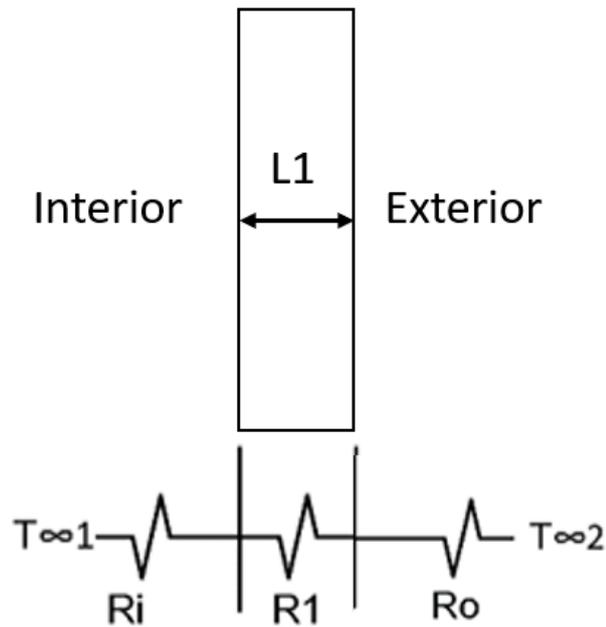


Figura 4: Composición de la pared

A continuación en la tabla 8 se muestra la conductividad térmica de los materiales de la cabina de pintura a temperatura ambiente, [8].

Tabla 8: Conductividad termica k

Material	k, W/m · ° C
Concreto	0.8
Acero	52
Vidrio	0.78

Primero se tiene que encontrar el coeficiente de transferencia por convección al interior de la cabina de pintura (h_i) y también el coeficiente de transferencia por convección al exterior (h_o). Con la intención de resolver el sistema de resistencias de la figura 4.

Para calcular el coeficiente de transferencia por convección al interior de la cabina, primero se tiene que calcular el número de Rayleigh que viene dado por (10) [8]:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{min}) L_c^3}{\nu} \quad (10)$$

Donde:

R_a : Número de Rayleigh

g : Gravedad

β : Coeficiente de expansión volumétrica del aire

T_s : Temperatura de la superficie

T_{min} : Temperatura ambiente

L_c : Longitud característica para una placa vertical

ν : Viscosidad cinemática del aire

Para gases ideales:

$$\beta = 1/T$$

El valor de la viscosidad se lo saca de la tabla 9.

Tabla 9: Propiedades del aire a la presión de 1atm [8]

Temp	Densidad	Calor específico	Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática
5	1.269	1006	1.754 $\times 10^{-5}$	1.382 $\times 10^{-5}$
10	1.246	1006	1.778 $\times 10^{-5}$	1.426 $\times 10^{-5}$
15	1.225	1007	1.802 $\times 10^{-5}$	1.470 $\times 10^{-5}$
20	1.204	1007	1.825 $\times 10^{-5}$	1.516 $\times 10^{-5}$
25	1.184	1007	1.849 $\times 10^{-5}$	1.552 $\times 10^{-5}$

$$R_a = \frac{9,81 \cdot \frac{1}{20} \cdot (22 - 20)4,16^3}{(1,516 \times 10^{-5})}$$

$$R_a = 4,6585 \times 10^6$$

Con esto se calcula el número de Nusselt dado por:

$$N_u = 0,59 R_a^{1/4}$$

$$N_u = 27,41$$

El coeficiente de transferencia por convección en el interior de la cabina viene dado por (11):

$$h_i = \frac{k \cdot N_u}{L_c} \quad (11)$$

Donde:

h_o : Coeficiente de transferencia por convección, en $W/m^2 \cdot K$

k_a : Conductividad térmica del aire a 20 grados celcius en $W/m \cdot K$

$$h_i = \frac{0,02514 \cdot 52,11}{4,16}$$

$$h_i = 0,16 W/m^2 \cdot K$$

Ahora se calcula el coeficiente de transferencia por convección en el exterior de la cabina que va hacer igual al interior.

$$h_o = 0,16 W/m^2 \cdot K$$

Teniendo los valores de los coeficiente de transferencia por convección interior y exterior, se calcula la composición de la paredes de la figura 4. Para eso se tiene que calcular por tramos ya que la cabina no cuenta con una estructura homogénea sino que varia según la zona, para entender mejor la distribución de la cabina la se observa la siguiente figura 5.

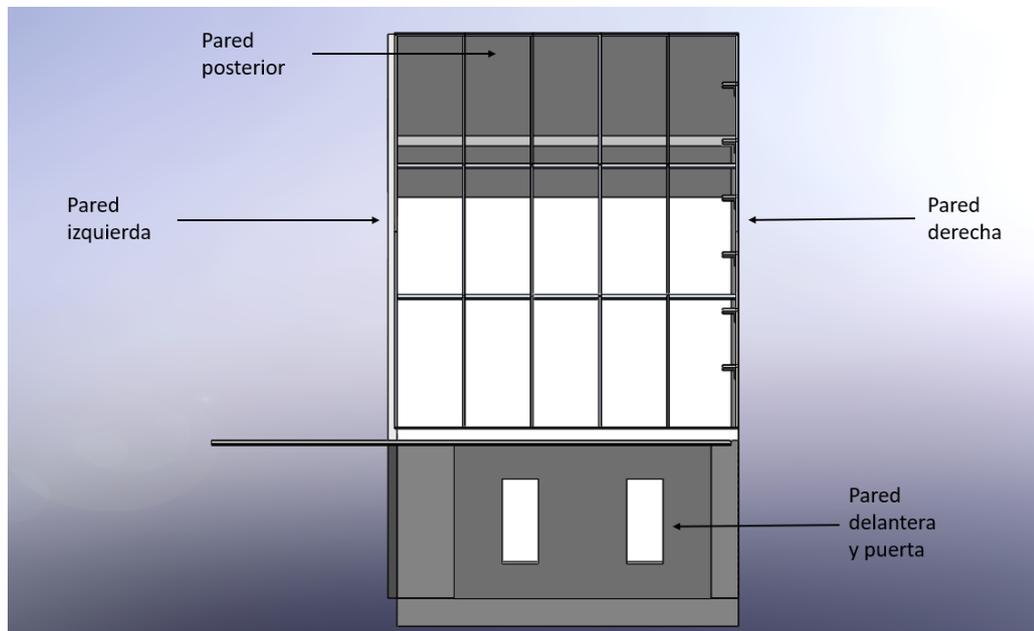


Figura 5: Distribución de la cabina

A continuación se trabajará con la pared izquierda que esta formada por una pared de concreto y una puerta de acero como se puede observar en la siguiente figura 6.

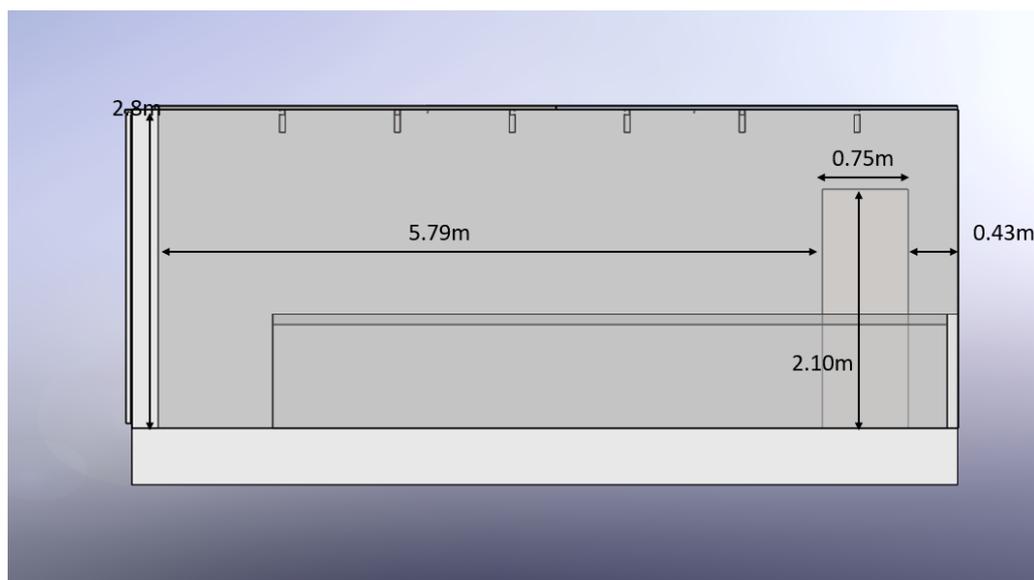


Figura 6: Pared izquierda

Ahora se tiene que calcular la composición de la pared en cada tramo, se selecciona

el primer tramo de concreto de 5.79m de ancho, 2.80 m de alto y 0.11m de espesor, y se calcula la resistencia dado por (12):

$$R_1 = \frac{L_1}{k \cdot A} \quad (12)$$

Donde:

L_1 : Espesor de la pared en m

k : Conductividad térmica, en W/m · °C

A : Área, en m²

$$R_1 = \frac{0,11}{0,8 \cdot 16,21}$$

$$R_1 = 0,008481\text{k/W}$$

Por consiguiente se calcula la resistencia total en ese tramo dado por (13).

$$R_t = R_i + R_1 + R_o \quad (13)$$

Donde:

R_i : Resistencia interior, en k/W

R_o : Resistencia exterior, en k/W

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 16,21}$$

$$R_i = 0,37\text{k/W}$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 16,21}$$

$$R_o = 0,37k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 0,7533k/W$$

Utilizando (9) se tiene:

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{0,7533}$$

$$\dot{Q} = 2,65W$$

Para el segundo tramo que será el que esta ubicado arriba de la puerta con las medidas de 0.75m de largo, 0.7 m de alto y 0.11m de ancho se obtiene:

$$R_2 = \frac{0,11}{0,8 \cdot 0,52}$$

$$R_2 = 0,2644k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 0,52}$$

$$R_i = 11,61k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 0,52}$$

$$R_o = 11,61k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 23,49k/W$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{23,49}$$

$$\dot{Q} = 0,085W$$

El tercer tramo será el que está ubicado alado de la puerta, con las dimensiones de 0.43m de largo, 2.8m de alto y 0.11 m de ancho siendo así tenemos:

$$R_3 = \frac{0,11}{0,8 \cdot 1,2}$$

$$R_3 = 0,1142k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 1,2}$$

$$R_i = 5,03k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 1,2}$$

$$R_o = 5,03k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 10,18k/W$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{10,18}$$

$$\dot{Q} = 0,19W$$

Por último, se tiene el tramo de la puerta que es de acero galvanizado y tiene 0.75m de largo, 2.1m de altura y 0.003m de ancho , en esta parte se obtiene:

$$R_4 = \frac{0,003}{52 \cdot 2,85}$$

$$R_4 = 0,00002k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,85}$$

$$R_i = 2,1188k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,85}$$

$$R_o = 2,1188 \text{ k/W}$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 4,2376 \text{ k/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{4,2376}$$

$$\dot{Q} = 0,47 \text{ W}$$

Sumando todos los calores de pérdida en esta parte se obtiene que:

$$\dot{Q}_T = 1,5 \text{ W}$$

Procediendo a calcular la pérdida de calor en la pared derecha como se observa en la figura 7.

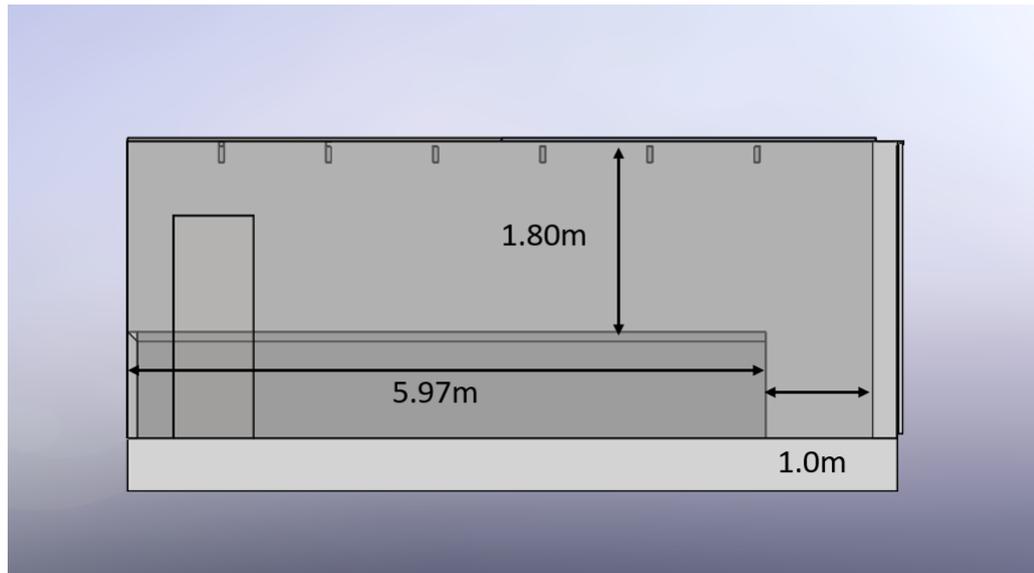


Figura 7: Pared derecha

Para el primer tramo se escoge la parte de concreto que tiene 5.97m de largo, 1m de alto y 0.09m de ancho obteniendo :

$$R_1 = \frac{0,09}{0,8 \cdot 5,97}$$

$$R_1 = 0,01884k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 5,97}$$

$$R_i = 1,01k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 5,97}$$

$$R_o = 1,01k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 0,75k/W$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{1,01}$$

$$\dot{Q} = 0,9795W$$

Para el segundo tramo se selecciona la parte de acero que tiene 5.97m de largo, 1.8m de alto y 0.003m de ancho obteniendo :

$$R_2 = \frac{0 - 003}{52 \cdot 10,75}$$

$$R_2 = 0,000005k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 10,75}$$

$$R_i = 0,56k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 10,75}$$

$$R_o = 0,56k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 1,1234k/W$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{1,1234}$$

$$\dot{Q} = 1,78W$$

Por último está la parte de acero que tiene 1m de largo, 2.8m de alto y 0.003m de ancho obteniendo :

$$R_3 = \frac{0,003}{52 \cdot 2,8}$$

$$R_3 = 0,000021k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,8}$$

$$R_i = 2,15k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,8}$$

$$R_o = 2,15k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 4,31\text{k/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{4,31}$$

$$\dot{Q} = 0,46\text{W}$$

Sumando todos los calores de pérdida en la pared derecha se tiene que:

$$\dot{Q}_T = 3,22\text{W}$$

Si siguiendo se va a calcular la pérdida de calor en la pared posterior como se observa en la figura 8.

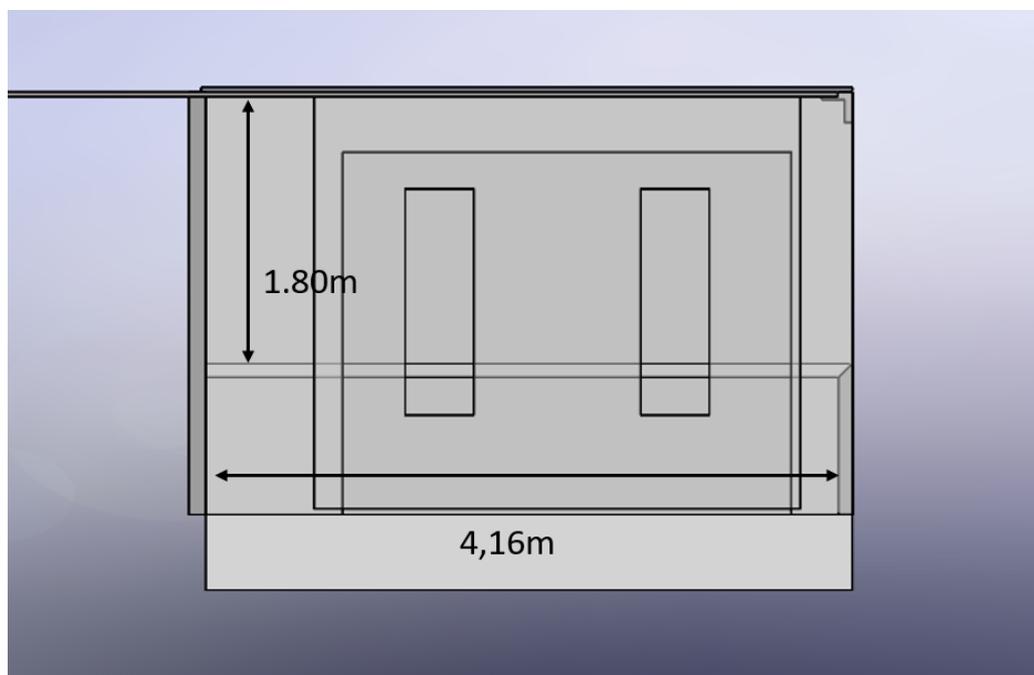


Figura 8: Pared posterior

Para el primer tramo se escoge la parte de concreto que tiene 4.16m de largo, 1m de alto y 0.09m de ancho obteniendo :

$$R_1 = \frac{0,09}{0,8 \cdot 4,16}$$

$$R_1 = 0,027k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 4,16}$$

$$R_i = 1,4516k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 4,16}$$

$$R_o = 1,4516k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 2,93k/W$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{2,93}$$

$$\dot{Q} = 0,6825W$$

Para el segundo tramo se escoge la parte de acero que tiene 4.16m de largo, 1.8m de alto y 0.003m de ancho obteniendo :

$$R_1 = \frac{0,003}{52 \cdot 7,49}$$

$$R_1 = 0,000008k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 7,49}$$

$$R_i = 0,8062k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 7,49}$$

$$R_o = 0,8062k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 1,61k/W$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{1,61}$$

$$\dot{Q} = 1,2403W$$

Sumando todos los calores de pérdida en la pared posterior se tiene que:

$$\dot{Q}_T = 1,92W$$

Ahora se calcula la pérdida de calor en la pared delantera como se observa en la figura

9.

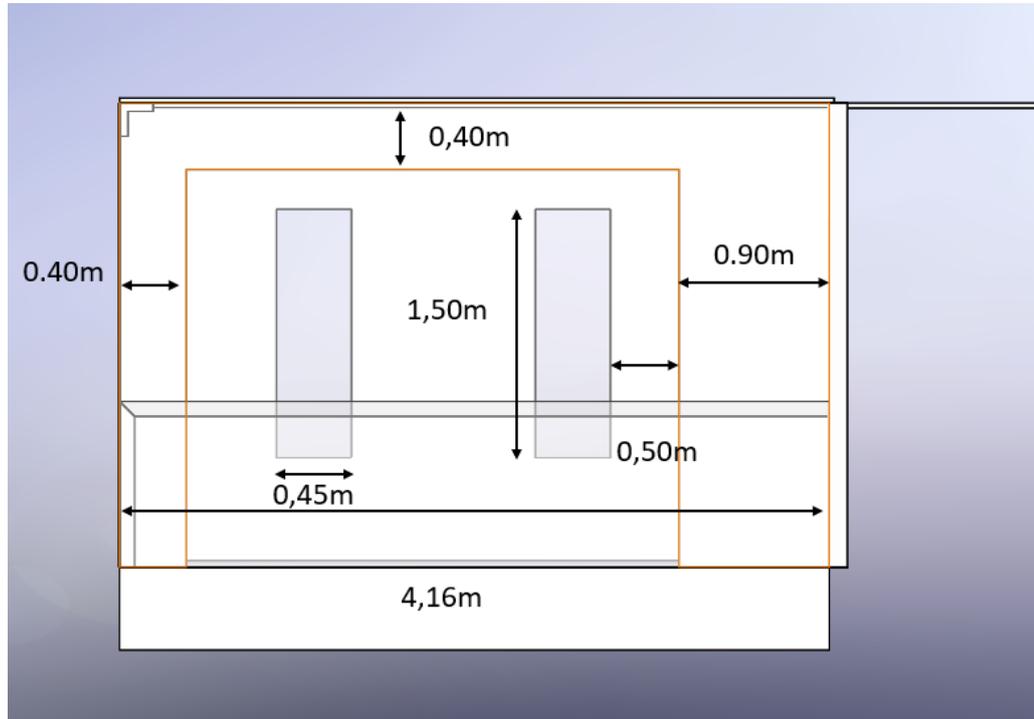


Figura 9: Pared delantera

Para el primer tramo se escoge la parte de concreto que tiene 0.4m de largo, 2.8m de alto y 0.23m de ancho obteniendo :

$$R_1 = \frac{0,23}{0,8 \cdot 1,12}$$

$$R_1 = 0,2567k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 1,12}$$

$$R_i = 5,39k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 1,12}$$

$$R_o = 5,39\text{k/W}$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 11,04\text{k/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{11,04}$$

$$\dot{Q} = 0,1811\text{W}$$

Para el segundo tramo se escoge la parte de concreto que tiene 0.9m de largo, 2.8m de alto y 0.23m de ancho obteniendo :

$$R_2 = \frac{0,23}{0,8 \cdot 2,52}$$

$$R_2 = 0,1141\text{k/W}$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,52}$$

$$R_i = 2,39\text{k/W}$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,52}$$

$$R_o = 2,39\text{k/W}$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 4,90\text{k/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{4,90}$$

$$\dot{Q} = 0,4076\text{W}$$

Para el tercer tramo se escoge la parte de concreto que tiene 2.86m de largo, 0.4m de alto y 0.23m de ancho obteniendo :

$$R_3 = \frac{0,23}{0,8 \cdot 1,14}$$

$$R_3 = 0,2522\text{k/W}$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 1,14}$$

$$R_i = 5,29\text{k/W}$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 1,14}$$

$$R_o = 5,29k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 10,84k/W$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{10,84}$$

$$\dot{Q} = 0,1843W$$

Para el cuarto tramo, se selecciona las ventanas como son iguales en dimensión se puede poner el área sumada de las dos para el cálculo teniendo en cuenta que una tiene 0.45m de largo, 1.50m de alto y 0.005m de ancho :

$$R_4 = \frac{0,005}{0,78 \cdot 1,35}$$

$$R_4 = 0,0048k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 1,35}$$

$$R_i = 4,47k/W$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 1,35}$$

$$R_o = 4,47\text{k/W}$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 8,95\text{k/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{8,95}$$

$$\dot{Q} = 0,2234\text{W}$$

Para el quinto tramo se elige las dos partes de acero que son iguales y que tienen 0.5m de largo, 2.4m de alto y 0.003m de ancho :

$$R_5 = \frac{0,003}{52 \cdot 2,4}$$

$$R_5 = 0,000024\text{k/W}$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,4}$$

$$R_i = 2,5161\text{k/W}$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,3149 \cdot 2,4}$$

$$R_o = 2,5161\text{k/W}$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 5,03\text{k/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{5,03}$$

$$\dot{Q} = 0,3974\text{W}$$

Para el último tramo se escoge la partes de acero que son iguales y que tienen 0.96m de largo, 2.4m de alto y 0.003m de ancho :

$$R_6 = \frac{0,003}{52 \cdot 2,304}$$

$$R_6 = 0,000025\text{k/W}$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,304}$$

$$R_i = 2,97\text{k/W}$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,304}$$

$$R_o = 2,97k/W$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 5,94k/W$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{5,94}$$

$$\dot{Q} = 0,3362W$$

Sumando todos los calores de pérdida en la pared delantera se tiene que:

$$\dot{Q}_T = 1,73W$$

Por último, se tiene el techo, como es todo del mismo material se lo calcula directamente:

$$R_6 = \frac{0,003}{52 \cdot 29,62}$$

$$R_6 = 0,00002k/W$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A}$$

$$R_i = \frac{1}{0,1656 \cdot 29,62}$$

$$R_i = 0,2038\text{k/W}$$

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A}$$

$$R_o = \frac{1}{0,1656 \cdot 2,4}$$

$$R_o = 0,2038\text{k/W}$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_o$$

$$R_t = 0,4077\text{k/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$\dot{Q} = \frac{22 - 20}{0,4077}$$

$$\dot{Q} = 4,90\text{W}$$

El calor necesario para calentar la cabina de pintura tomando en cuenta la pérdida en las paredes es igual:

$$\dot{Q}_1 = 13,27\text{W}$$

Con esto se observa que la cantidad que se va a perder por las paredes, es mínima entonces se puede concluir que la cabina si funciona con calefactores infrarrojos no necesita de aislamiento térmico.

11.1.7. Sistema de iluminación

La iluminación en una cabina de pintura es bastante importante, porque ayuda a detectar fallas en el pintado. También sirve para garantizar que el color que se esta utilizando es igual a las demás piezas del carro. Para diseñar el sistema de iluminación se utilizará el método lúmenes, con el objetivo de calcular el número de lámparas necesarias para la

cabina. Tomando en cuenta que una cabina de pintura debe tener un nivel de iluminación de 2000 luxes. Se usará ese dato para el diseño. Siendo así se calcula el índice de la cabina, utilizando la ecuación de una iluminación directa y mixta que viene dado por (14) [9],

$$K = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} \quad (14)$$

Donde:

K : Índice del local

a : Ancho del local

b : Largo del local

h : Altura del local

$$K = \frac{4,16 \cdot 7,12}{2,8 \cdot (4,16 + 7,12)}$$

$$K = 0,937$$

Con este valor se observa en la tabla 10. Para determinar la clasificación del índice.

Tabla 10: Índice del local [9]

Índice del local	Clasificación del índice del local
0.50-0.70	1
0.70-0.90	2
0.90-1.10	3
1.10-1.40	4
1.40-1.75	5
1.75-2.25	6
2.25-2.75	7
2.75-3.50	8
3.50-4.50	9

4.50-6.50	10
-----------	----

En este caso se obtiene una clasificación del índice del local de tres para una iluminaria tipo difusor.

Ahora se debe determinar el factor de utilización que es la relación entre el flujo de luz que emite la lámpara y el flujo de luz útil que es la que llegará a la superficie. Como toda la cabina es de color blanco se utilizará una reflectancia en la cavidad del techo del 80% y en las paredes de 50%. Para ello, se utilizará la tabla 11

Tabla 11: Factor de utilización [9]

Clasificación del índice del local	Coefficiente de utilización
1	8.80
2	7.70
3	6.80
4	6.00
5	5.30
6	4.70
7	4.20
8	3.80
9	3.40
10	3.10

Con el valor obtenido anteriormente se tiene un coeficiente de utilización es de 6.8. También se adquiere el coeficiente de mantenimiento 1.2 [9] que es la relación entre el nivel de iluminación media en la zona iluminada después de un determinado periodo de funcionamiento de la lámpara en servicio y el nivel de iluminación media obtenida al inicio del funcionamiento de la lámpara cuando era nueva [9].

Con estos valores se puede calcular el flujo luminoso total en la cabina de pintura dado por (15) [9],

$$0T = \frac{E \cdot S}{U \cdot M} \quad (15)$$

Donde:

$0T$: Flujo luminoso total

E : Nivel de iluminacion

S : Superficie de la cabina

U : Factor de utilización

M : Coeficiente de mantenimiento

$$0T = \frac{2000 \cdot 29,61}{6,8 \cdot 1,2}$$

$$0T = 7259,61$$

Ahora se procede a calcular el número de lámparas necesarias que viene dado por (16) [9]:

$$N = \frac{0T}{0L} \quad (16)$$

Donde:

$0T$: Flujo luminoso total

Se opta por la lámpara que se encuentra en el mercado la cual es la LED P T8 glass 600 8W 100pct 6500K CT, y se tomó el flujo luminosos de 1050 lm [9]. Reemplazando valores se tiene que :

$$N = \frac{0T}{0L}$$

$$N = \frac{7259,61}{1050}$$

$$N = 6,91 = 7$$

Son siete las lámparas necesarias para la cabina de pintura.

11.1.8. Estructura de la cabina

La cabina de pintura de Rosso Motors ya estaba implementada a excepción de una rejilla en el cual el diseño se determinará más adelante. Haciendo uso del software para ingeniería SolidWorks, se realizó el diseño 3D de la cabina con el objetivo de analizar si la estructura tiene un buen factor de seguridad para garantizar la seguridad de los trabajadores.

11.1.9. Análisis de factores de diseño en la estructura

Para analizar los factores de diseño se debe tomar en cuenta únicamente la estructura, la cual va a hacer la encargada de soportar las cargas. Primero, se comenzó a analizar el techo de la cabina, porque es el punto donde más carga habrá. En este lugar están las láminas de acero que sirven como recubrimiento y también estarán los ventiladores. La estructura del techo se muestra en la figura 10.

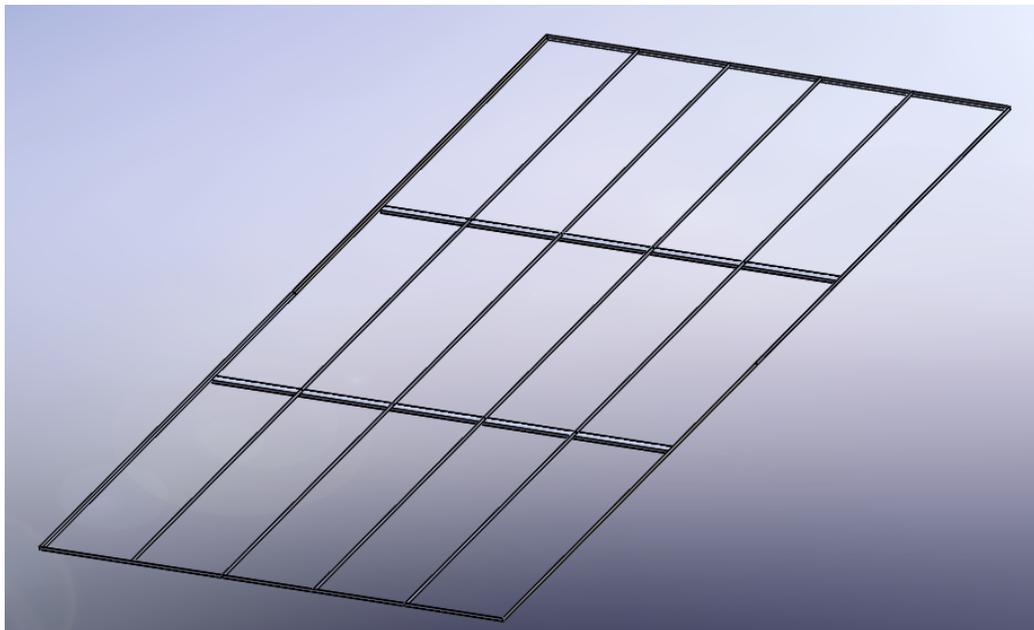


Figura 10: Estructura del techo de la cabina

Primero se calcula el peso total de las láminas de acero que van a estar a lo largo del techo por lo que se empieza a calcular el área del techo donde 17:

$$A = \text{Ancho} \cdot \text{Largo} \quad (17)$$

$$A = 4,16m \cdot 7,12m$$

$$A = 29,62m^2$$

El área del techo que hay que cubrir es de 29,62 m². Las láminas son de acero galvanizado de 1 mm de espesor y su peso es de 23.37 Kg [10]. Las láminas galvanizadas tienen dimensiones de 1.22m de ancho por 2.44m de largo. El área que tiene cada plancha será:

$$A = 1,22m \cdot 2,44m$$

$$A = 2,97m^2$$

Siendo así se necesitan diez planchas galvanizadas para cubrir el techo cuyo peso total sería:

$$m = 23,37kg$$

$$P = m \cdot g$$

$$P = 23,37kg \cdot 9,81m/s$$

$$P = 229,26N$$

Al peso obtenido lo multiplicamos por 10 que es el número de laminas

$$P_t = 229,26N \cdot 10$$

$$P_t = 2292,6N$$

De la tabla 7 se calcula el peso de los ventiladores siendo:

$$m = 9,7lb = 43,99kg$$

$$P = m \cdot g$$

$$P = 2 \cdot 23,37kg \cdot 9,81m/s$$

$$P = 863,084N$$

Con el peso máximo que va a soportar el techo se procede a realizar la simulación en el software, donde la figura 11 muestra los resultados de tensiones.

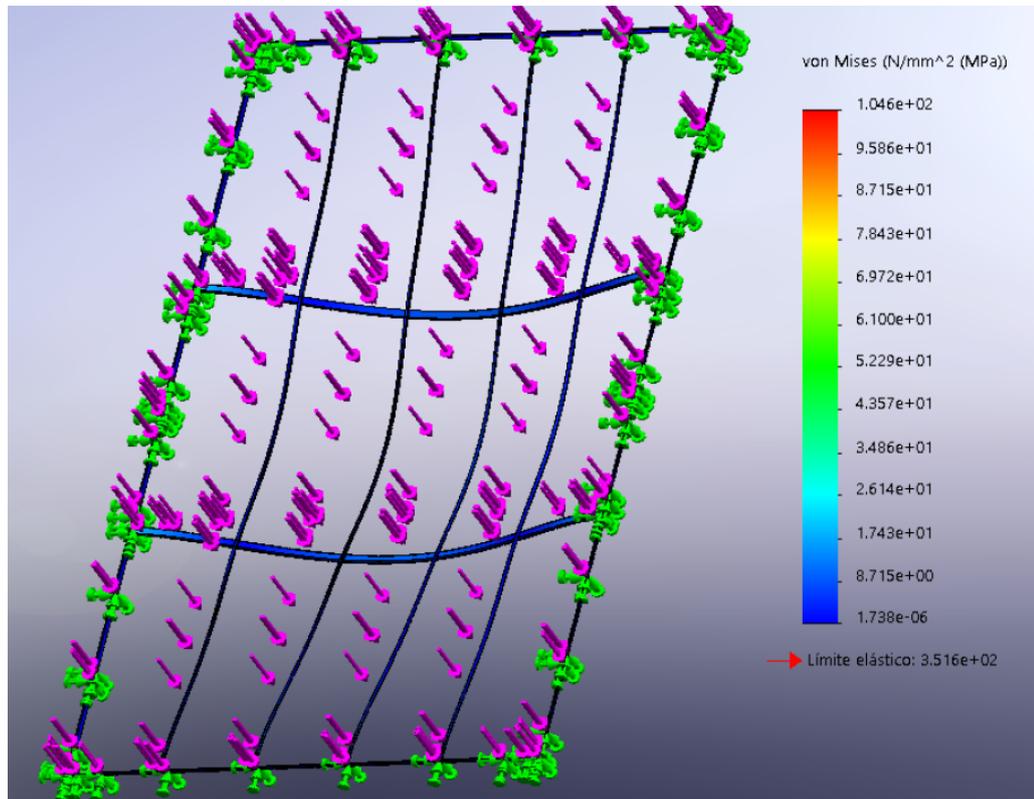


Figura 11: Esfuerzos obtenidos

En la figura se observa el límite elástico que es el esfuerzo máximo que puede soportar el material y también está el esfuerzo de trabajo con lo que se calcula el factor de seguridad de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Esfuerzomaximo}{Esfuerzodetrabajo}$$

$$\eta = \frac{351,6Mpa}{104,6Mpa}$$

$$\eta = 3,36$$

Con el factor de seguridad se observa que la estructura esta sobre dimensionada, esto quiere decir que se gasto mucho dinero para su diseño, sin embargo puede servir para un

futuro implementar los ductos de ventilación que generarían más peso y seguramente lo podría aguantar.

También es importante calcular el peso máximo que pueden aguantar las láminas que están en la parte posterior y parte izquierda de la cabina. Porque tendrán que soportar los calentadores infrarrojos y también las luces. Estas laminas son de 1,8m de alto, 0,3m de ancho y de 2mm de espesor.

Siendo así, primero se calcula el peso que va a soportar una lámina que en este caso sería el peso de los calentadores que son de 5 kg y se lo calcula de la siguiente manera:

$$P = m \cdot g$$

$$P = 5kg \cdot 9,81$$

$$P = 49,05N \cdot g$$

Después se calcula el esfuerzo dado por,18 [11]:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (18)$$

: Donde:

σ : Esfuerzo en Pa

F : Fuerza aplicada en N

A : Área transversal en m

Donde el área transversal viene dado por:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d)^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (0,005)^2$$

$$A = 0,00002m$$

Con este dato se obtiene el esfuerzo:

$$\sigma = 2,4981MPa$$

Se calcula el factor de seguridad, para esto se requiere el módulo de elasticidad del material que se lo puede obtener de la siguiente tabla 12.

Tabla 12: Constantes físicas de materiales [11]

Material	Módulo de elasticidad (GPa)	Límite elástico (Mpa)	Coefficiente de Poisson
Aleación de aluminio	70	250	0.33
Aleación de titanio	105	850	0.36
Acero	205	550	0.27
Aleación de magnesio	45	170	0.29

Se observa que el módulo de elasticidad del aluminio es de 250 MPa, con lo que se tiene que el factor de seguridad será igual a :

$$\eta = \frac{Esfuerzomaximo}{Esfuerzodetrabajo}$$

$$\eta = \frac{250Mpa}{2,49Mpa}$$

$$\eta = 100,40$$

El factor de seguridad es elevado porque las lámparas no representan un peso relevante para las paredes.

11.1.10. Diseño de las rejillas de la cabina de pintura

Dentro de la cabina de pintura se encuentra un hueco en el piso de 0,27m de largo y de 4,16 m de ancho, para taponarlo se opta por poner una rejilla, para el diseño de la rejilla primero se calculó el peso que va a tener que soportar. Se usará el caso de la Ford Raptor y su masa de 3090kg. Este peso se lo distribuye en las cuatro llantas, donde las llantas de adelante tendrán el 60 % del valor total de la masa del coche y las llantas traseras tendrán el 40 % esto se considera porque el centro de gravedad de una camioneta esta más adelante como se observa en la figura 12.

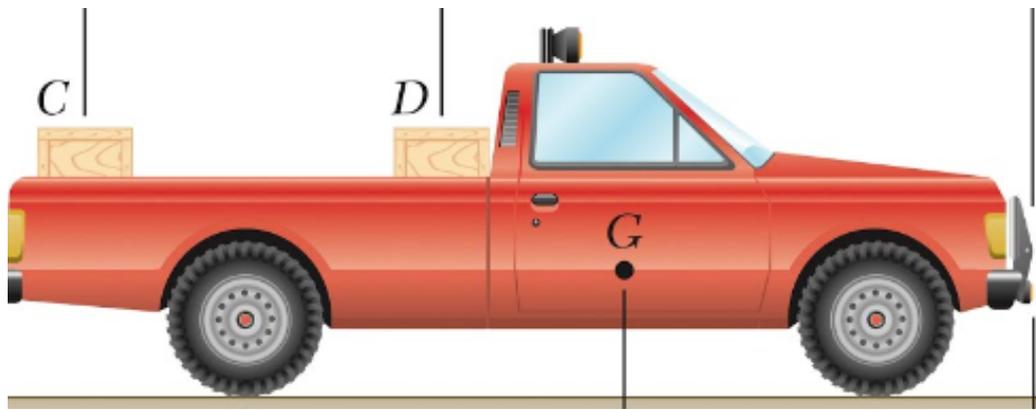


Figura 12: Centro de gravedad en una camioneta [12]

Con esto se tiene que la masa para una llanta delantera que será de 927 kg y multiplicándolo por la gravedad será igual a 9093.87 N. A este valor se lo divide entre tres, porque la llanta se asentará en tres vigas pudiendo así distribuir el peso. Quedando que cada viga soportará 3031,29 N. Este peso se lo representara como una carga puntual en la mitad de la viga como se muestra en la siguiente figura 13.

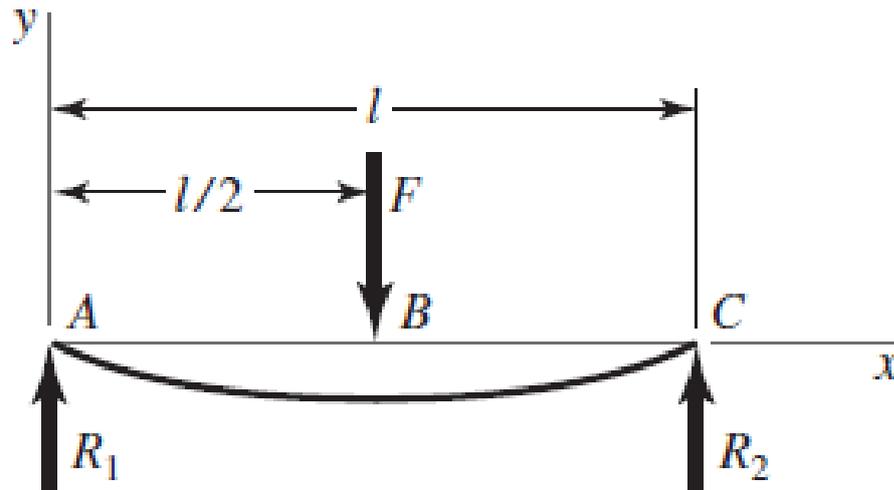


Figura 13: Análisis viga

Ahora se calcula las reacciones realizando sumatoria de fuerzas y de momentos. Se comienza a calcular las fuerzas en x:

$$\sum F_x = 0$$

Porque no hay reacciones en este eje. Continuando se calculará la sumatoria de momentos:

$$\sum M_a = 0$$

$$0 = F \cdot \frac{l}{2} - R_2 \cdot l = 0$$

$$0 = 3031,29 \cdot \frac{0,27}{2} - R_2 \cdot 0,27 = 0$$

$$R_2 = 1515,65N$$

Se analizará las reacciones en el eje y:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 - F + R_2 = 0$$

$$R_1 = 1515,65N$$

Obtenido esto se puede gráficar el diagrama de cortantes y momentos que se puede observar en la figura 14 y 15 respectivamente.

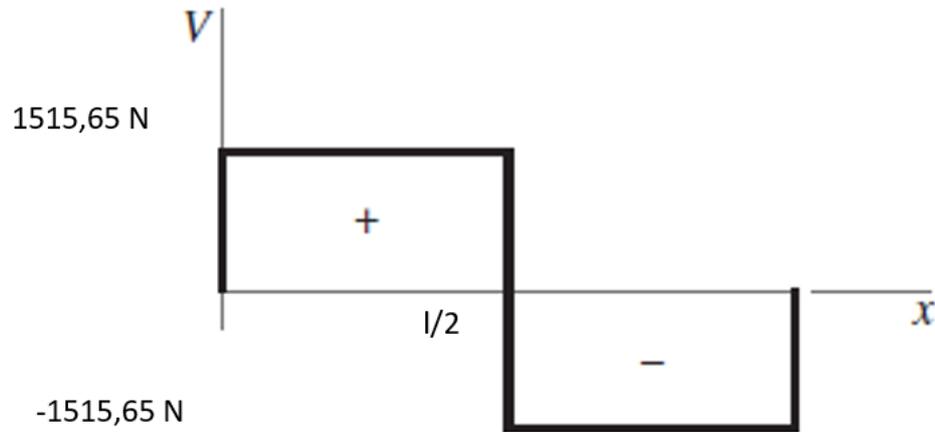


Figura 14: Diagrama de cortante

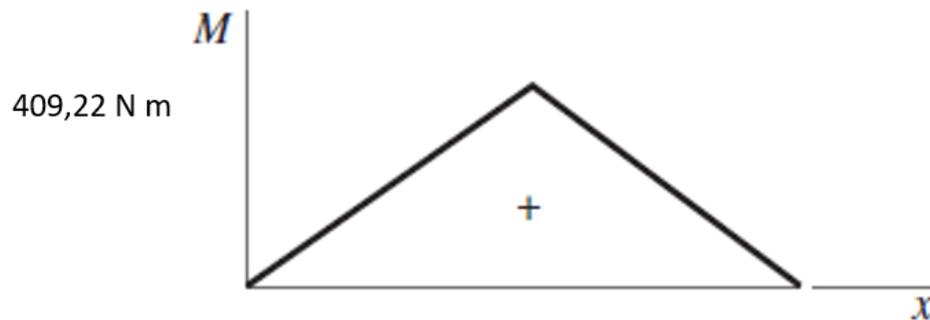


Figura 15: Diagrama de momento

En la mitad de la viga se encontrará el mayor momento este punto será el que se analizará. Ahora se va a calcular el esfuerzo máximo que viene por 19:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (19)$$

: Donde:

M : Momento

c : Magnitud máxima

I : Segundo momento del area

Para una sección transversal circular el momento se lo puede expresar como 20:

$$\sigma = \frac{32}{\pi \cdot d^3} \cdot M \quad (20)$$

: Donde:

d : Diametro del tubo

$$\sigma = \frac{32}{\pi \cdot 0,02^3} \cdot 409,22$$

$$\sigma = 521,03MPa$$

El valor de la resistencia a la tensión del acero G1080 laminado en caliente es de 770Mpa [11]. Con este valor se obtiene el factor de seguridad:

$$\eta = \frac{770MPa}{521MPa}$$

$$\eta = 1,47$$

La viga si soportará el peso de la Ford ranger y de otros vehículos que son más livianos.

11.2. Diseño electrónico

En la parte de diseño eléctrico se va a elegir los componentes y se relacionara con los cálculos obtenidos en el diseño mecánico. También se realizará un cálculo del consumo total que va a tener la cabina de pintura. Este dato se utilizará más adelante para analizar los costos de electricidad que va a tener la empresa por usar la cabina. Conociendo esto se va a realizar los siguientes cálculos:

- Cálculo eléctrico sistema de iluminación
- Cálculo eléctrico sistema de ventilación

- Cálculo eléctrico sistema de control
- Cálculo eléctrico sistema de calentadores

También es fundamental mencionar que el sistema de iluminación, ventilación y control serán alimentados con 110 V, mientras que el sistema de calentadores será alimentado por un voltaje de 220 V. Esto será importante para saber el número de cable a utilizar en cada sistema.

11.2.1. Cálculo eléctrico sistema de iluminación

Como ya se observó en la sección de sistema de iluminación se eligió utilizar siete lámparas tipo difusor fluorescente tienen una potencia de 18 vatios, las cuales se puede ver en la siguiente figura 16.



Figura 16: Foco utilizado [13]

El voltaje con el cual se va a alimentar las lámparas será de 110V. Cada lámpara tiene un consumo de 18W y que adquiere siete lámparas para alcanzar la luminosidad deseada se obtiene que:

$$Pt = P * 7$$

$$Pt = 18 * 7$$

$$Pt = 126W$$

Como se conoce la potencia y el voltaje se puede calcular la corriente necesaria de la siguiente ecuación 21 [14]:

$$P = V \cdot I \quad (21)$$

: Donde:

P : Potencia, en W

V : Voltaje, en V

I : Corriente, en A

$$P = V \cdot I$$

$$126 = 110 \cdot I$$

$$I = 1,145A$$

11.2.2. Cálculo eléctrico sistema de ventilación

Para los ventiladores que la empresa ya tenía lo que se hizo es buscar la hoja de especificaciones técnicas la cual se muestra en la tabla 7. De donde se obtiene la potencia de 69W por ventilador, teniendo ese valor se sujeta a la ecuación 21.

$$Pt = P * 2$$

$$Pt = 69 * 2$$

$$Pt = 138W$$

$$P = V \cdot I$$

$$138 = 110 \cdot I$$

$$I = 1,255A$$

11.2.3. Cálculo eléctrico sistema de control

Para el sistema de control hay que elegir un controlador que sea capaz de cumplir todos los requisitos necesarios para la cabina de pintura por lo que se hizo el siguiente análisis que se muestra en la tabla 13.

Tabla 13: Selección del controlador para el proceso

Alternativa	Imagen	Descripción
Arduino Uno		<p>El arduino uno está basado en el controlador ATmega328P, cuenta con 14 pines de entrada y salida digital y 6 entradas analógicas, es fácil de programar pero no tiene la opción de programar una interfaz gráfica [15].</p>

Tabla 13: Selección del controlador para el proceso

Alternativa	Imagen	Descripción
Raspberry Pi 3		<p>Tiene 1GB RAM, también cuenta con 40 pines de entrada y salida, cuenta con un conector HDMI y puertos USB para poder conectar un mouse y un teclado, también tiene la posibilidad de programar una interfaz gráfica para el usuario [16].</p>
Simatic S7-1200		<p>Cuenta con la ventaja de adaptar una pantalla, también tiene una interfaz gráfica programable con la finalidad de adaptarse a las necesidades del usuario, cuenta con un sistema de protección además de poder utilizar su interfaz gráfica para poder simular el comportamiento del sistema [17].</p>

El controlador elegido debido al precio es el Raspberry Pi 3, además de ser el que mejor se acopla a la necesidad de este proyecto. El Raspberry Pi 3 tiene un voltaje de funcionamiento de 5 V y 2,5 A, con estos datos se calcula la potencia necesaria :

$$P = V \cdot I$$

$$P = 5 \cdot 2,5$$

$$P = 12,5W$$

Dentro del sistema de control también se tiene el sensor de temperatura, el valor que se mida mediante este sensor será el encargado de controlar el encendido y apagado de los calentadores. Para ello se eligió un Módulo transmisor MAX6675 que permite conectar una termocupla tipo K y convierte la señal analógica a digital. El rango de medida de la termocupla es de 0 grados centígrados a 123 grados centígrados, el rango suficiente para la aplicación, estos dispositivos se pueden observar en la figura 17.



Figura 17: Max6675 y termocupla tipo K [18]

Este controlador junto la termocupla según su hoja de datos menciona que tiene un voltaje de funcionamiento de 3.3 V y 1.5 mA. Con estos se puede calcular la potencia de la siguiente manera:

$$P = V \cdot I$$

$$P = 3,3 \cdot 0,0015$$

$$P = 4,95mW$$

11.2.4. Cálculo eléctrico sistema de calentadores

Teniendo en cuenta que cada lámpara necesita de 220 voltios y 4.4 amperios para su funcionamiento, por ello se colocan 4 lámparas en paralelo para que les llegue el mismo voltaje tal y como se observa en la figura 18.

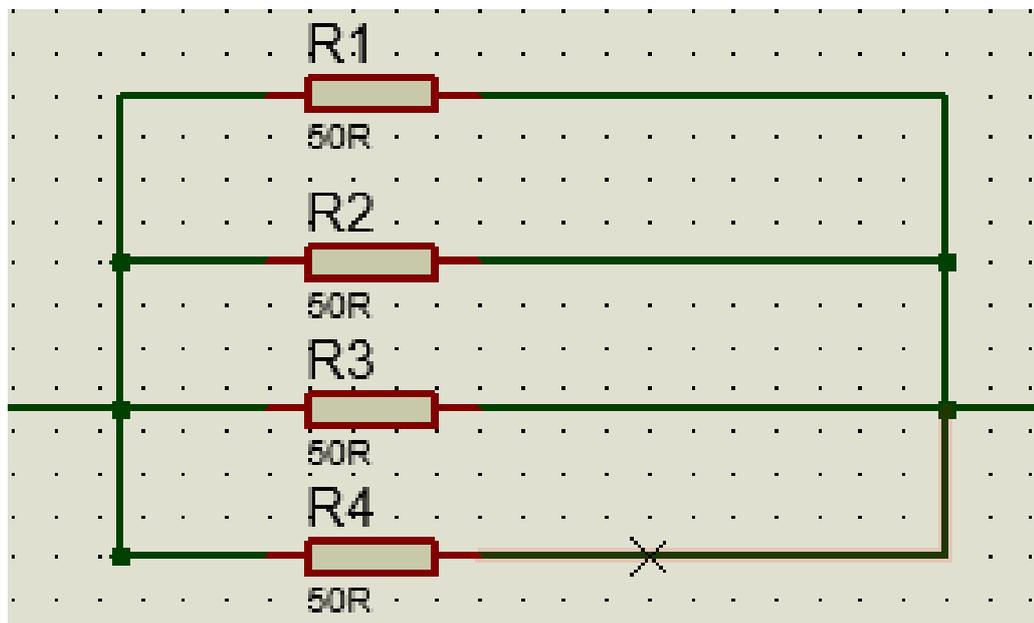


Figura 18: Resistencias en paralelo

Con estos datos tenemos que :

$$R_t = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} \right)^{-1}$$

$$R_t = \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{50} + \frac{1}{50} + \frac{1}{50} \right)^{-1}$$

$$R_t = 12,5Ohms$$

$$V = I \cdot R_t$$

$$220 = I \cdot 12,5$$

$$I = 17,6A$$

$$P = V \cdot I$$

$$P = 220 \cdot 17,6$$

$$P = 3872W$$

Por el incremento de la corriente al poner las resistencias en paralelo solamente se utilizará cuatro a la vez. Teniendo diez juegos de dos lámparas cada una tendrá que irse prendiendo y apagando según la zona que se quiera calentar. Si se requiere un calentamiento de todo el auto se irán prendiendo y apagando de manera progresiva para mantener el mismo consumo a lo largo del tiempo. Para su activación se utilizarán relés que puedan soportar este voltaje y amperaje, para el cual se ha seleccionado el siguiente relé que puede soportar hasta 30 amperios y se lo puede observar en la figura 19.



Figura 19: Relé seleccionado

11.2.5. Elección del tamaño del cable para cada etapa.

Conociendo el consumo que tendrán cada uno de los elementos y agrupándolos según el voltaje de funcionamiento tenemos la siguiente tabla 14.

Tabla 14: Resumen del consumo eléctrico

Voltaje de funcionamiento	Sistema	Corriente en cada sistema	Potencia en cada sistema
110 V	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistema de iluminación ■ Sistema de ventilación 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 1.145 A ■ 1.255 A 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 126 W ■ 138 W
220 V	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistema de calentadores 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 17.6 A 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3872 W
5 V	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistema de control ■ Sensor de temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 2.5 A ■ 0.0015 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 12.5 W ■ 0.00495 W

En la figura 20 se observa el tamaño de cada cable y el amperaje que soporta de acuerdo con la temperatura de trabajo.

Amperaje que soportan los cables de cobre					
Nivel de temperatura:	60°C	75°C	90°C	60°C	
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2	SPT	
Medida / calibre del cable	Amperaje soportado			Medida / calibre del cable	Amperaje soportado
14 AWG	15 A	15 A	15 A	20 AWG	2 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A		
10 AWG	30 A	30 A	30 A	18 AWG	10 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A		
6 AWG	55 A	65 A	75 A	16 AWG	13 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A		
3 AWG	85 A	100 A	115 A	14 AWG	18 A
2 AWG	95 A	115 A	130 A		
1 AWG	110 A	130 A	145 A	12 AWG	25 A
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A		
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A		
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A		
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A		

Figura 20: Amperaje que soportan los cables de cobre

Para los sistemas de alimentación de 110V y 5V se utilizará cable 14, es importante mencionar que si existen en el mercado cable 16 pero suelen romperse con facilidad. Para el sistema de calentadores donde se llegarán a corrientes de 17.6 A se utilizará cable 10 para garantizar la seguridad del cableado.

11.3. Programación

Para la programación se realizará una programa que sea amigable con el usuario donde se pueda seleccionar la etapa del pintado. Se optó por reducir a dos etapas de funcionamiento, la etapa de pintado y la etapa de secado puesto que las lámparas infrarrojas solo calientan el material y no el aire, no se necesita la última etapa donde se tenía que extraer todo el aire caliente para que la cabina alcance la temperatura ambiente. Adicional hay que tomar en cuenta que solamente cuatro lámparas de los quemadores pueden estar prendidas simultáneamente para no exceder la corriente calculada. Toda esta información se tomó en cuenta para la programación de la interfaz.

11.3.1. Diagrama de flujo de la cabina de pintura

En la figura 21. Se muestra el flujo de funcionamiento del programa principal.

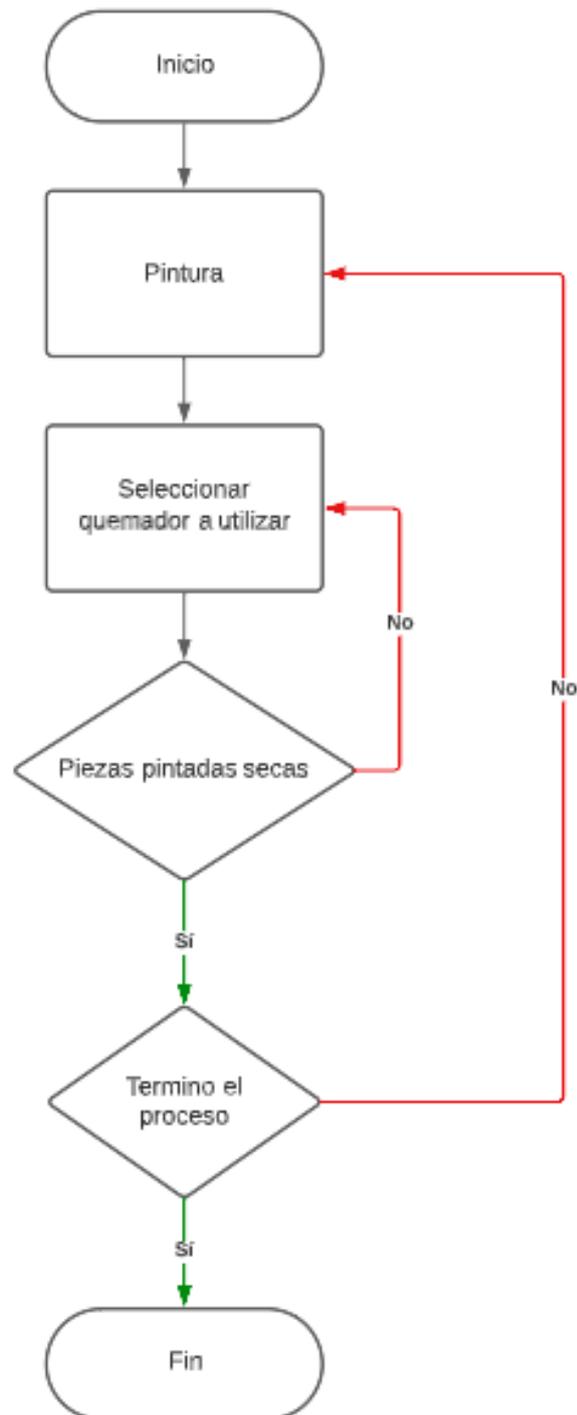


Figura 21: Diagrama de flujo

Primero se pinta la o las piezas que se va a trabajar terminado la etapa de pintura se procede a seleccionar el quemador según la zona del auto en donde se quiera enfocar la energía. Después se verificá si las piezas se han secado de no ser así se selecciona nuevamente el quemador. Si no se continúa con la verificación si el proceso ha terminado se daría fin o si el proceso no terminar se repite todo, esto debido a que hay muchas etapas

de pintado y cada una de ellas necesita realizar todo el proceso.

11.3.2. Interfaz gráfica

Se usa el lenguaje de programación Python para poder realizar el programa, dentro de este se encontrará la librería tkinter que va hacer la herramienta fundamental para la creación interfaz gráfica. Primero se comienza definiendo los seis pines de salida que se van a utilizar, cinco para el control de los calentadores y uno para el control de los ventiladores. Luego se procede a crear las funciones encargadas del control de la cabina. Continuando se crea la interfaz gráfica y gracias a causa las funciones se hizo mucho más fácil la implementación. El producto final obtenido se lo puede observar en la figura 22 .

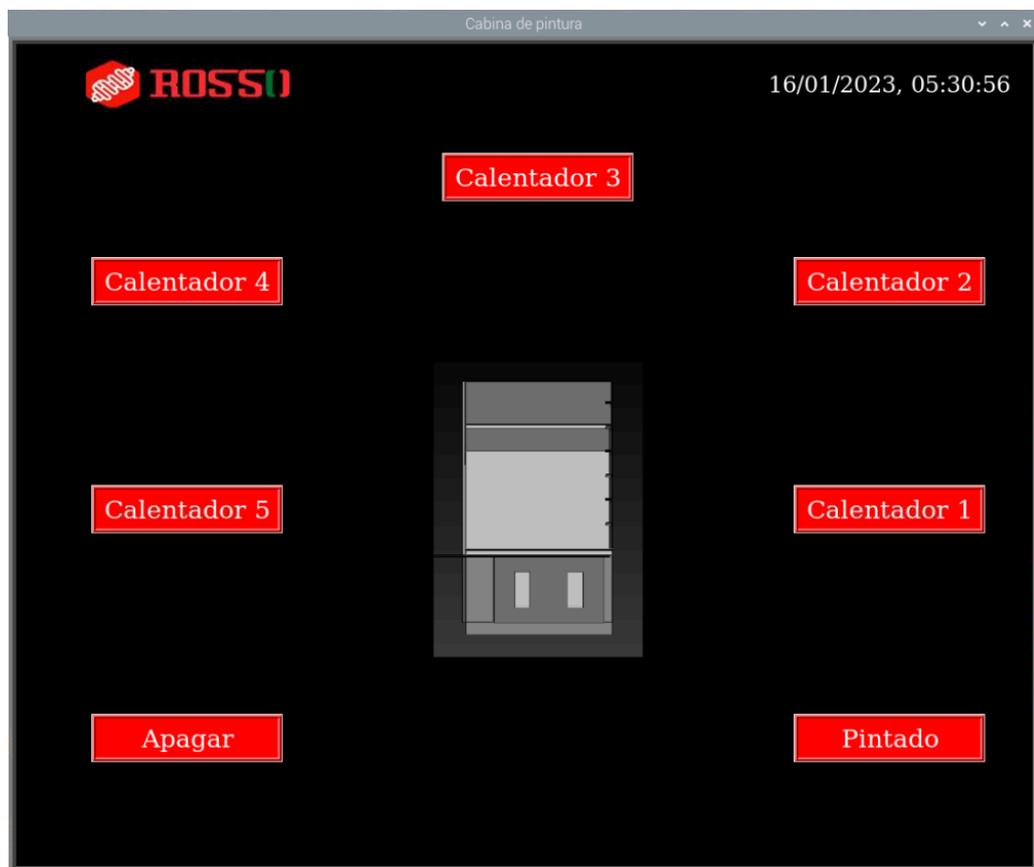


Figura 22: Interfaz gráfica

12. Construcción

Para el proceso de construcción, primero se analizó la estructura de la cabina ya la empresa ya tenía implementada. Para poderla completar etapa por etapa y lograr una cabina

de pintura completa y funcional. La cabina de pintura inicial se la observa en la figura 23.



Figura 23: Cabina inicial

A la cabina de pintura le falta, el sistema de calentamiento, sistema de ventilación y completar la estructura. También tiene un hueco en el piso y existen partes del techo que no están completas. Siendo así primero se procedió a instalar los calentadores junto a todo el cableado eléctrico que necesitaban. Para ello se usó canaletas y tubo corrugado, que sirve como protección. Este proceso se lo puede apreciar en la figura 24.



Figura 24: Instalación de quemadores

Teniendo los quemadores listos, se procedió a colocar los ventiladores. Al igual que los quemadores se usó cable corrugado para la protección del cableado. Además, se instalaron los filtros para que las partículas de pintura no se mezclen con el aire en el exterior. Por otro lado, se cortó láminas de acero para completar los espacios faltantes antes mencionados. Esto se observa en la figura 26.



Figura 25: Instalación de ventiladores y techo

Con el cableado de los ventiladores y los quemadores se procedió a instalar la caja de control, dentro de ella se ubicaran los relés y el raspberry que servirán para el control de la cabina de pintura. La conexión se observa en la figura 26.

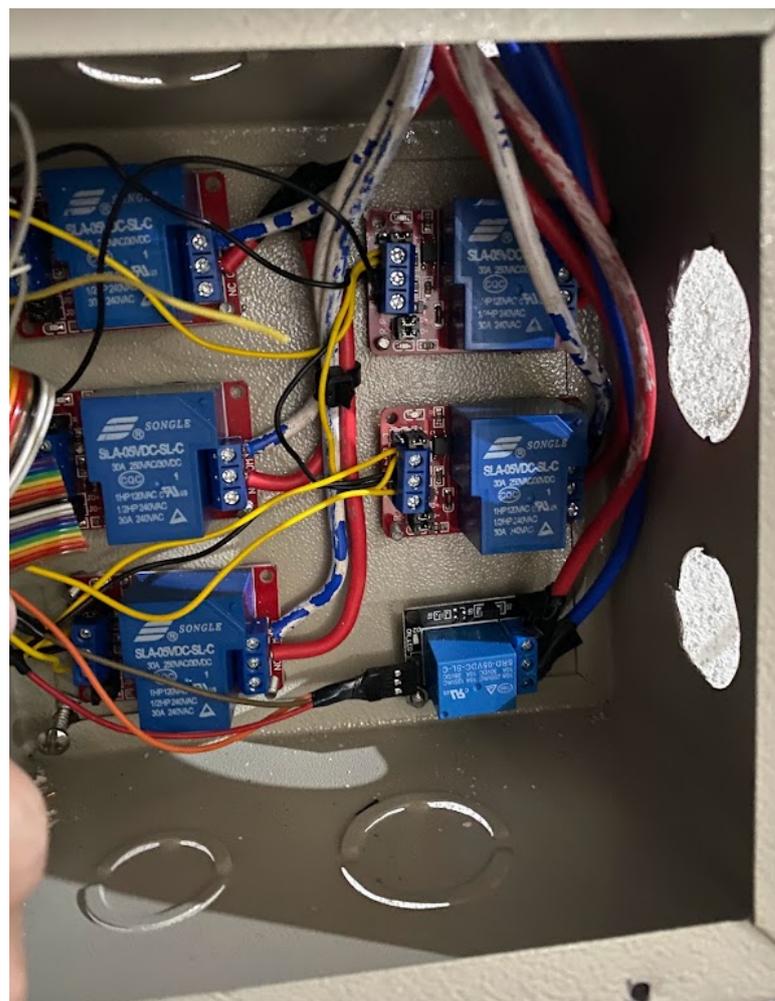


Figura 26: Caja de control

Finalmente se conecto a las tomas de energía ya establecidas para cada etapa, se coloco la rejilla diseñada, y se procedió a pintar la cabina de pintura para poder realizar las pruebas. El resultado final lo podemos observar en la figura 27.



Figura 27: Cabina final

13. Pruebas y Resultados

Se puso a prueba los diferentes sistemas de la cabina de pintura con la finalidad de ver su resultado ya en el campo laboral, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

13.1. Prueba de consumo

Para comprobar el consumo se utilizó un multímetro MUT-105, el resultado se puede observar en la figura 28.



Figura 28: Amperaje en la línea

El amperaje varió con un valor de 0.22, debido a que las lámparas al calentarse pierden resistencia produciendo que se aumente un poco el amperaje, si existe variación pero no es considerable, conocido esto se pondrá un fusible de 20A por cada línea de calentadores, con la finalidad de proteger al circuito de alguna sobre carga.

13.2. Prueba de calentadores

Para comprobar los cálculos obtenidos anteriormente se acopló una pieza para que este a un metro de distancia del calentador y ver en una sección de área la temperatura que alcanza la pieza, para ello se ocupó una pistola infrarroja para medir temperatura como se aprecia en la figura 29.



Figura 29: Temperatura máxima alcanzada por cada lámpara

El valor máximo de temperatura que alcanza la lámpara es de 551.1 celcius. Usando este dato y ocupando las ecuaciones anteriores se compara las medidas calculadas y las medidas obtenidas con la pistola de temperatura los resultados podemos apreciar en la tabla 15 y la tabla 16 respectivamente.

Tabla 15: Mediciones calculadas

A (m ²)	r (m)	θ_1 (°)	ω (sr)	I_{1-2} (W/m ² · sr)	θ_2 (°)	\dot{Q} (W)	T (C)
0.0004	1	0	0.0004	7414.47	0	0.1127	39.51
0.0004	1	9	0.00039	7414.47	10	0.1096	37.35
0.0004	1.029	9	0.00037	7414.47	11.2	0.1030	32.55
0.0004	1.005	0	0.00039	7414.47	0	0.1116	38.73
0.0004	1.096	0	0.00033	7414.47	20	0.0881	20.88
0.0004	1.150	0	0.00030	7414.47	20	0.0801	13.91

Tabla 16: Mediciones con pistola infrarroja y error calculado

T (C)	Error (%)
39.7	0.48
37.2	0.40
32.8	0.75
39.1	0.94
20.1	3.87
13.4	3.77

En estas tablas podemos observar que las ecuaciones si nos dan un valor cercano a la temperatura real, adicional se observa la importancia de los ángulos y la distancia puesto que, se aprecia una variación al modificar alguno de estos factores.

13.3. Aumento de temperatura de los calentadores

Otro dato que es importante resaltar es el tiempo que los calentadores se demoran en alcanzar su máxima temperatura, para ello se realizó las mediciones cada diez segundos y se obtuvo los datos que se muestran en la tabla 17.

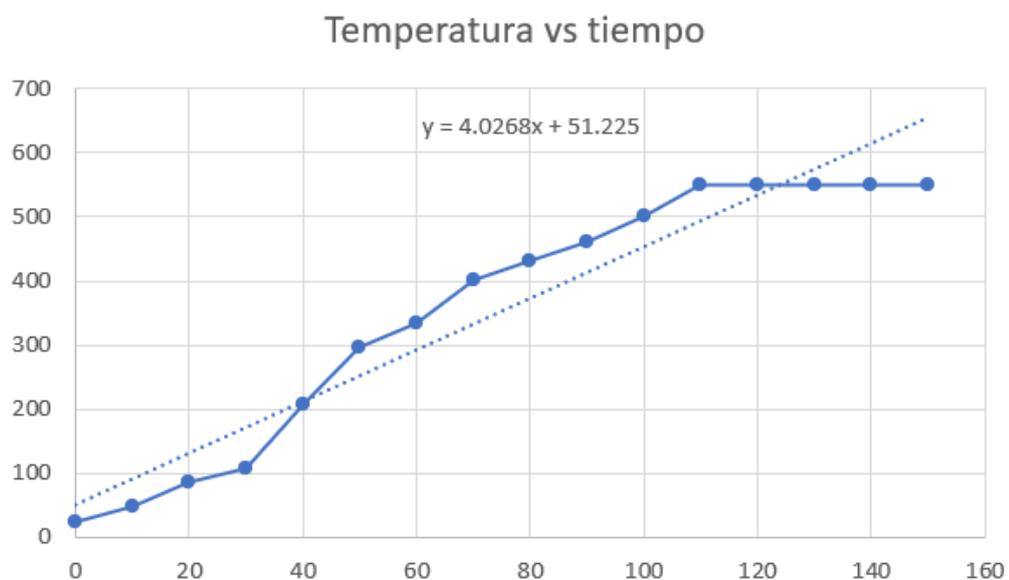
Tabla 17: Temperatura vs tiempo

Temperatura (C)	Tiempo (s)
25	0
47.2	10
85.5	20
108.6	30
254.8	40

Tabla 17: Temperatura vs tiempo

Temperatura (C)	Tiempo (s)
330.9	50
363.0	60
431.5	70
459.9	80
480.5	90
510.8	100
551.1	110
551.1	120
551.1	130
551.1	140
551.1	150

A estos datos se lo graficará y se los podrá observar el resultado en la figura 30.

**Figura 30:** Temperatura vs tiempo

Vemos que el aumento de la temperatura tiende a un comportamiento lineal, y alcanza su temperatura máxima en solo 110 segundos.

13.4. Distribución de calor en la pieza

La distribución de calor en una pieza es otro tema que es esencial medir, como se mencionó anteriormente la distribución de calor no va a hacer equitativa sino que habrá partes donde exista más calor, para comprobar la temperatura máxima que va a transmitir las lámparas se ubicó una pieza y se midió el calor en los diferentes puntos, los resultados se los observa en la figura 31.



Figura 31: Distribución de calor por una pieza

Se debe tomar en cuenta que los valores de temperatura no van a hacer constantes siempre, sino que dependerá de la ubicación de la pieza con respecto a los calentadores. Esto nos sirve para encontrar el punto donde la temperatura alcanzará el mayor y menor valor, como se ve en la figura la pieza alcanzó 39.8 grados en el punto más alejado y 55.4 grados en el punto más perpendicular a los calentadores.

13.5. Tiempo de secado

Para el tiempo de secado se hicieron varias pruebas, la primera con una pieza de metal, la segunda con una pieza de plástico y finalmente se hizo una prueba del tiempo que se demora el secado de un auto completo, y se comparó con el tiempo que se demora sin usar los calentadores. Los resultados se muestran en la tabla 18.

Tabla 18: Tiempo de pintado

Material	Proceso	Tiempo de secado sin calentadores	Tiempo de secado con calentadores
Plástico	Pintura de fondo	3 horas	20 minutos
Plástico	Pintura de base	1 horas	10 minutos
Plástico	Barniz	5 horas	40 minutos
Metal	Pintura de fondo	2 horas	10 minutos
Metal	Pintura de base	1 horas	15 minutos
Metal	Barniz	4 horas	30 minutos
Carro completo	Pintura de fondo	8 horas	1 hora y 15 minutos
Carro completo	Pintura de base	4 horas	50 minutos
Carro completo	Barniz	24 horas	2 horas

De la tabla se analiza que existe una disminución considerable en el tiempo de secado, cumpliendo así el objetivo principal de aumentar la productividad en el taller.

14. Análisis de costos

Es importante conocer el valor que tiene los componentes usados en la cabina, de igual manera hay que conocer el precio que va a tener el utilizarla. Esto se aprecia en la tabla 19

y 20 respectivamente.

Tabla 19: Costo total de los componentes de la cabina de pintura

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
Quemadores 10 sets	1	600	600
Rollo cable 12	2	41	82
Rollo cable 14	2	35	70
Rele 30A	5	9	45
Rele 10A	1	4	4
Fusible 20A	5	7.5	37.5
Rele 10A	1	7.5	7.5
Raspberry	1	265	265
Pantalla	1	140	140
Cable HDMI	1	15	15
Pernos autoperforantes	40	0.08	3.2
Pernos 5mm	40	0.12	4.8
Tacos 5mm	40	0.18	7.2
Broca 5mm	1	4.3	4.3
Caja metálica 15x15 mm	1	5.05	5.05
Taipe	2	4.25	8.5
Canaletas	8	3.25	26
Rollo corrugado metro	2	35	70
Disco de corte	5	2.4	12
Plancha metálica 1220 x 2440 mm	10	35	350
Lamparas	7	30	210
Mouse	1	5	5

Tabla 19: Costo total de los componentes de la cabina de pintura

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
Mano de obra albañil por día	30	10	300
Mano de obra de diseño por hora	30	60	1800
Total			4074.05

Tabla 20: Ganancia por pieza de pintura

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
Pintura de fondo en gramos	200	0.018	3.6
Catalizador en gramos	50	0.015	0.75
Pintura base en gramos	125	0.032	4
Estabilizador en gramos	125	0.012	1.5
Barniz en gramos	180	0.03	5.4
Catalizador en gramos	60	0.01	0.6
Reductor en gramos	24	0.005	0.12
Consumo quemadores kW/h	3.872	0.9	3.4848
Consumo ventiladores kW/h	0.84	0.9	0.756
Consumo luz kW/h	0.126	0.9	0.11
Pintura por pieza	1	60	60
Total			39.6758

Se tendrá que pintar 103 piezas para recuperar la inversión.

15. Conclusiones y Recomendaciones

- La cabina de pintura cuenta con dos modos de funcionamiento el de pintado y el de secado. Esto es debido a la facilidad que dan los calentadores al calentar la pieza en muy poco tiempo. De igual manera al perder esta energía la pieza llega a temperaturas normales en muy poco tiempo ya que el aire estará solamente a 2 grados mas que la temperatura ambiente.
- Aunque no se logre una distribución de calor equitativa en todo el cuerpo, ya que el objeto a secar varia en rangos de 55.4 grados Celsius de temperatura máxima y 39.8 grados Celsius de temperatura mínima. Se obtiene una reducción del tiempo de secado de 365 minutos. Logrando reducir los tiempos de producción en el área de pintura, puesto que la empresa puede pintar una mayor cantidad de piezas al día.
- Se recomienda cambiar los ventiladores porque solamente realizan 45 renovaciones de aire por hora, el objetivo es llegar a realizar las 100 renovaciones de aire por hora.
- Por otro lado se comprobó el factor de seguridad que tendrá la estructura de la cabina de pintura, donde se verifica que efectivamente el techo va a soportar todo el peso de los ventiladores y de las laminas de acero con un factor de seguridad de 3,36. También se diseñó unas rejillas que van a soportar el peso del vehículo con un factor de seguridad de 1,47. Con esto se garantiza la seguridad de las personas que estén en el interior de la cabina y también la seguridad del vehículo.
- Aunque el consumo de la cabina suma una potencia de 4148,5 W debido a los quemadores, este precio está justificado porque se pueden pintar más piezas al día ya que se redujo el tiempo de secado.
- Para poder recuperar la inversión se tendrá que pintar 103 piezas, tomando en cuenta los gastos por consumo y materiales.
- Se observó que las ecuaciones de transferencia de calor por radiación dieron valores muy cercanos a la realidad obteniendo un error máximo de 3.77%, y se comprobó

que el ángulo y la distancia a la que este el objeto de los quemadores va a afectar a la temperatura máxima que va a alcanzar la pieza.

- La temperatura máxima que puede alcanzar una superficie de la pieza es de 55.4 grados Celsius, esto es muy beneficiosos porque no hay necesidad de apagar los calentadores cada cierto tiempo sino que pueden funcionar de forma continua hasta que termine de secar la pieza.
- Al usar calentadores infrarrojos se concluye que no es necesario realizar un aislamiento en la estructura. Ya que enfocan su energía en calentar el objeto y no el aire. Se obtuvo una pérdida de calor mínima de 13.27 W en las paredes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Quemadores de gasóleo y de gas*, 1st ed., De Drietrich, Francia, 2022.
- [2] J. Sumba, "Diseño de una cabina de pintura para el taller de latonería y pintura carrocerías wilson," Ph.D. dissertation, Esc. Ing. Mecánico, Universidad Politecnica Salésiana, Cuenca, Ecuador, 2022.
- [3] *Manual Automotriz*, 1st ed., Sherwin williams, Estados Unidos, 2018.
- [4] *Como calcular las renovaciones por hora según la actividad de un local*, 1st ed., Casals, España.
- [5] *Cálculo y Diseño de Sistemas de Ventilació*, norma DIN 1946, Inglaterra, 1991.
- [6] *Manual del propietario del circulador de aire Modelo: FC-100, FC-200, FC-300, FC-420*, 1st ed., Xpower, Estados Unidos, 2020.
- [7] R. Mott y J. Untener, *Mecánica de fluidos*, séptima ed. Pearson - México, 2015.
- [8] Y. Cengel y A. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*, cuarta ed. Mc Graw Hill - México, 2011.
- [9] Cálculo del número de iluminarias. [En línea]. Disponible: <http://132.248.48.64/repositorio/moodle/pluginfile.php/1731/modresource/content/11/contenido/index.html> [Fecha de consulta: Septiembre 2022]
- [10] Planchas galvanizadas. [En línea]. Disponible: <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/planchas-galvanizadas/> [Fecha de consulta: Octubre 2022]
- [11] R. Budynas y K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, novena ed. Mc Graw Hill - México, 2012.
- [12] Equilibrio de cuerpo rígido. [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=dy3EPSAT99U> [Fecha de consulta: Septiembre 2022]

- [13] Opplé. [En línea]. Disponible: <https://www.opple.es/es/product/lamparas/tubos/tubo-t8>
[Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [14] H. Daniel, *Electrónica de potencia*, primera ed. Pearson - Madrid, 2001.
- [15] Arduino uno. [En línea]. Disponible: <https://arduino.cl/arduino-uno/U> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [16] Raspberry. [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [17] Simatic s7-1200. [En línea]. Disponible: <https://new.siemens.com/mx/es/productos/automatizacion/systems/industrial/plc/s7-1200.html> [Fecha de consulta: Diciembre 2022]
- [18] Termocupla k + transmisor max6675. [En línea]. Disponible: <https://naylorlampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/123-termocupla-k-transmisor-max6675.html> [Fecha de consulta: Noviembre 2022]