



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“DESARROLLO DE UN MODELO TÉRMICO DE LA CABINA DE  
UN VEHÍCULO PARA PREDECIR SU COMPORTAMIENTO  
TÉRMICO BAJO VARIAS CONDICIONES AMBIENTALES  
EXTERIORES”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTORES:**

JUAN MIGUEL TRUJILLO TELLO

CHRISTIAN JAVIER MACHADO SOLÍS

Riobamba – Ecuador

2021



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“DESARROLLO DE UN MODELO TÉRMICO DE LA CABINA DE  
UN VEHÍCULO PARA PREDECIR SU COMPORTAMIENTO  
TÉRMICO BAJO VARIAS CONDICIONES AMBIENTALES  
EXTERIORES”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTORES:**

JUAN MIGUEL TRUJILLO TELLO

CHRISTIAN JAVIER MACHADO SOLÍS

**DIRECTOR:** PhD. FERNANDO MAURICIO TELLO OQUENDO

Riobamba – Ecuador

2021

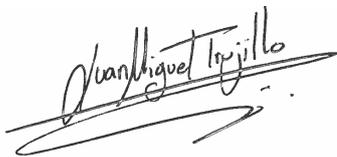
**© 2021, Juan Miguel Trujillo Tello & Christian Javier Machado Solís**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, JUAN MIGUEL TRUJILLO TELLO y CHRISTIAN JAVIER MACHADO SOLÍS, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados de este son auténticos y originales. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 14 de septiembre 2021



---

**Juan Miguel Trujillo Tello**

040136881-6



---

**Christian Javier Machado Solís**

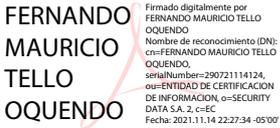
180467928-8

# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

## FACULTAD DE MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de Titulación: Tipo: Proyecto de investigación, **“DESARROLLO DE UN MODELO TÉRMICO DE LA CABINA DE UN VEHÍCULO PARA PREDECIR SU COMPORTAMIENTO TÉRMICO BAJO VARIAS CONDICIONES AMBIENTALES EXTERIORES”**, realizado por los señores: **JUAN MIGUEL TRUJILLO TELLO** y **CHRISTIAN JAVIER MACHADO SOLÍS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. José Francisco Pérez Fiallos <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 JOSE FRANCISCO PEREZ FIALLOS Firmado digitalmente por JOSE FRANCISCO PEREZ FIALLOS	2021-09-14
PhD. Fernando Mauricio Tello Oquendo <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	 FERNANDO MAURICIO TELLO OQUENDO Firmado digitalmente por FERNANDO MAURICIO TELLO OQUENDO Nombre de reconocimiento (DN): cn=FERNANDO MAURICIO TELLO OQUENDO, serialNumber=29072114124, ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION, o=SECURITY DATA S.A. 2, c=EC Fecha: 2021.11.14 22:27:34 -05'00'	2021-09-14
PhD. Daniela Carina Vásquez Núñez <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	 DANIELA CARINA VASCONEZ NUNEZ Firmado digitalmente por DANIELA CARINA VASCONEZ NUNEZ Nombre de reconocimiento (DN): cn=DANIELA CARINA VASCONEZ NUNEZ, serialNumber=300721141225, ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION, o=SECURITY DATA S.A. 2, c=EC	2021-09-14

## **DEDICATORIA**

Mi tesis la dedico con todo amor y cariño a mis padres por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera para nuestro futuro y por creer en mí, a pesar de los momentos difíciles siempre han estado brindándome su comprensión y apoyo.

A mis hermanos por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.

A mis profesores y amigos que sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas, y a todas las personas que durante estos años estuvieron a mi lado apoyándome y lograron hacer realidad esta meta.

**Juan**

El presente trabajo de titulación se lo dedico principalmente a mis padres que siempre han sido mi motor y apoyo incondicional para seguir siempre adelante, que gracias a su esfuerzo, sacrificio, dedicación y amor que tienen por sus hijos me permiten continuar en este proceso de ser un futuro profesional en el país.

**Christian**

## **AGRADECIMIENTO**

El agradecimiento principalmente a Dios, por darme la vida y la sabiduría para poder llegar hasta esta etapa de mi vida.

A mi familia que siempre me brindaron su apoyo y confianza para poder lograr cada uno de mis objetivos desde pequeño, y ahora me acompañan en el proceso de obtener mi título profesional.

A mis amigos y futuros colegas con quienes he compartido estos años de mi vida, por el apoyo que tuve y que siempre supimos levantarnos de las derrotas y darnos esos ánimos en los peores momentos de nuestra formación profesional.

Agradezco también a nuestros docentes de la Carrera de Ingeniería Automotriz por impartir sus conocimientos a lo largo de la carrera y de manera especial al Ing. Fernando Tello, nuestro tutor de tesis, quien ha guiado con paciencia e integridad nuestro trabajo de titulación.

**Christian.**

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....</b>	<b>4</b>
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Marco teórico.....	6
1.3. Elaboración de modelos de transferencia de calor.....	6
1.4. Termodinámica y transferencia de calor.....	8
1.4.1 <i>Primera ley de la termodinámica</i> .....	9
1.5. Balance de calor en un vehículo.....	10
1.6. Cargas o ganancias térmicas.....	11
1.6.1 <i>Ganancias de energía por conducción, convección y radiación</i> .....	11
1.6.2 <i>Ganancias de energía a través de las superficies exteriores</i> .....	12
1.6.3 <i>Ganancias internas por ocupación</i> .....	12
1.6.4 <i>Ganancia debido a infiltraciones</i> .....	14
1.7. Procesos de transferencia de calor.....	14
1.7.1 <i>Conducción</i> .....	15
1.7.2 <i>Conductividad térmica</i> .....	17
1.7.3 <i>Convección</i> .....	18
1.7.4 <i>Radiación</i> .....	20
1.8. Confort térmico.....	22
1.9. Efecto de la radiación solar en la temperatura del vehículo.....	23
1.9.1 <i>Temperatura en la carrocería</i> .....	24
1.10. Tipos de vidrio para vehículos.....	24
1.10.1 <i>Vidrio laminado</i> .....	24
1.10.2 <i>Vidrio templado</i> .....	25

## CAPÍTULO II

2.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	26
2.1.	<b>Equipos y herramientas</b> .....	26
2.1.1	<i>Calefactor</i> .....	26
2.1.2	<i>Sensor de temperatura DS18B20</i> .....	27
2.1.3	<i>Piranómetro</i> .....	29
2.1.4	<i>Ecowitt DS102 USB Data Logger</i> .....	30
2.2.	<b>Caracterización del vehículo de prueba</b> .....	32
2.3.	<b>Escenarios experimentales</b> .....	35
3.3.1	<i>Ensayo experimental 1 (sin incidencia solar)</i> .....	35
2.3.2	<i>Ensayo experimental 2 (sin incidencia solar)</i> .....	37
2.3.3	<i>Ensayo experimental 3 (con incidencia solar)</i> .....	37
2.4.	<b>Análisis del comportamiento térmico del vehículo</b> .....	38
2.4.1	<i>Condiciones ambientales</i> .....	38
2.4.2	<i>Cargas térmicas</i> .....	38
2.4.3	<i>Tipos de superficies opacas</i> .....	39
2.4.4	<i>Tipos de superficies acristaladas</i> .....	39
2.5.	<b>Condiciones para las simulaciones</b> .....	39
2.6.	<b>Recolección de datos</b> .....	40
2.6.1	<i>Conexiones del sensor de temperatura DS18B20 con Arduino</i> .....	40
2.6.2	<i>Identificación de los sensores de temperatura</i> .....	41
2.6.3	<i>Adquisición de datos de sensores mediante su dirección única.</i> .....	42
2.7.	<b>Descripción del modelo termodinámico del vehículo</b> .....	43
2.7.1	<i>Procedimiento para el cálculo de temperaturas de superficies</i> .....	47
2.8.	<b>Software de simulación</b> .....	49

## CAPÍTULO III

3.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	57
3.1.	<b>Análisis e interpretación de resultados de los experimentos</b> .....	57
3.1.1	<i>Ensayo experimental 1</i> .....	57
3.1.2	<i>Ensayo experimental 2</i> .....	58
3.1.3	<i>Ensayo experimental 3</i> .....	60
3.2.	<b>Validación del modelo térmico de la cabina del vehículo</b> .....	61
3.2.1	<b>Validación del modelo sin radiación solar</b> .....	61
3.2.2	<b>Validación del modelo con radiación solar</b> .....	64

<b>3.3.</b>	<b>Análisis del comportamiento térmico del vehículo.....</b>	<b>67</b>
<b>3.3.1</b>	<b><i>Influencia del tipo de cristales y color del vehículo en la temperatura interior con un ocupante (simulación 4).....</i></b>	<b>68</b>
<b>3.3.2</b>	<b><i>Influencia del tipo de cristales y color del vehículo en la temperatura interior con dos ocupantes (simulación 5). .....</i></b>	<b>71</b>
<b>3.3.3</b>	<b><i>Influencia del tipo de cristales y color del vehículo en la temperatura interior con cinco ocupantes (simulación 6).....</i></b>	<b>74</b>
<b>3.4.</b>	<b>Comparación de resultados de las simulaciones.....</b>	<b>77</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>83</b>
	<b>GLOSARIO</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente .....	17
<b>Tabla 2-1:</b>	Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.....	19
<b>Tabla 3-1:</b>	Emisividad de materiales a 300 K.....	21
<b>Tabla 4-1:</b>	Propiedades de las superficies acristaladas termo físicas y ópticas .....	25
<b>Tabla 1-2:</b>	Especificaciones de calefactor COMFORT ZONE .....	27
<b>Tabla 2-2:</b>	Especificaciones del sensor DS18B20.....	28
<b>Tabla 3-2:</b>	Especificaciones de medidor solar SM206-SOLAR.....	30
<b>Tabla 4-2:</b>	Especificaciones Medidor de temperatura DS-102.....	31
<b>Tabla 5-2:</b>	Especificaciones técnicas del vehículo de prueba.....	33
<b>Tabla 6-2:</b>	Dimensiones de las superficies .....	34
<b>Tabla 7-2:</b>	Materiales en las superficies de la cabina. ....	34
<b>Tabla 8-2:</b>	Descripción de los ensayos y equipos de medición .....	35
<b>Tabla 9-2:</b>	Propiedades superficies opacas.....	39
<b>Tabla 10-2:</b>	Propiedades superficies acristaladas .....	39
<b>Tabla 11-2:</b>	Condiciones de simulación .....	40
<b>Tabla 1-3:</b>	Resultados temperatura máxima del ensayo experimental 1 .....	58
<b>Tabla 2-3:</b>	Resultados temperatura máxima del ensayo experimental 2 .....	59
<b>Tabla 3-3:</b>	Temperaturas (°C) ensayo experimental 1 vs modelo .....	63
<b>Tabla 4-3:</b>	Temperaturas (°C) ensayo experimental 2 vs modelo .....	64
<b>Tabla 5-3:</b>	Resultado y validación del modelo térmico.....	65
<b>Tabla 6-3:</b>	Resultados de la temperatura máxima en la simulación 4 .....	70
<b>Tabla 7-3:</b>	Resultados de la temperatura máxima en la simulación 5 .....	71
<b>Tabla 8-3:</b>	Resultados de temperatura (°C) máxima en la simulación 6 .....	76
<b>Tabla 9-3:</b>	Temperaturas (°C) del aire interior para diferentes condiciones de simulación...	77
<b>Tabla 10-3:</b>	Demanda térmica (kW) de la cabina para diferentes condiciones de simulación	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Modelado matemático de problemas físicos .....	7
<b>Figura 2-1:</b>	Transferencia de calor.....	8
<b>Figura 3-1:</b>	Primera ley termodinámica .....	10
<b>Figura 4-1:</b>	Balance de calor .....	11
<b>Figura 5-1:</b>	Tasas de calor metabólico excedente de acuerdo con el nivel de actividad.....	14
<b>Figura 6-1:</b>	Procesos de transferencia de calor .....	15
<b>Figura 7-1:</b>	Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión .....	15
<b>Figura 8-1:</b>	Transferencia unidimensional de calor por conducción.....	16
<b>Figura 9-1:</b>	Conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente. ....	18
<b>Figura 10-1:</b>	Enfriamiento por convección forzada vs natural .....	19
<b>Figura 11-1:</b>	Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies a su alrededor. ....	20
<b>Figura 12-1:</b>	Temperatura de comodidad térmica según ASHRAE 55-2010 .....	23
<b>Figura 13-1:</b>	Comportamiento térmico en la carrocería según el color. ....	24
<b>Figura 1-2:</b>	Calefactor eléctrico 750-1500 Watts.....	27
<b>Figura 2-2:</b>	Sensores de temperatura DS18B20.....	28
<b>Figura 3-2:</b>	Piranómetro SM206-Solar .....	29
<b>Figura 4-2:</b>	USB Data Logger modelo DS-102 .....	31
<b>Figura 5-2:</b>	Vehículo de estudio.....	32
<b>Figura 6-2:</b>	Geometría de superficies de una cabina.....	33
<b>Figura 7-2:</b>	Geometría de superficies de la cabina en SolidWorks.....	34
<b>Figura 8-2:</b>	Ubicación de calefactor en el interior del vehículo.....	36
<b>Figura 9-2:</b>	Esquema de ubicación de sensores de temperatura.....	36
<b>Figura 10-2:</b>	Vehículo al interior de un garaje sin incidencia solar .....	37
<b>Figura 11-2:</b>	Ubicación del equipo SM206-SOLAR para la medición de la irradiación solar .	38
<b>Figura 12-2:</b>	Configuraciones del sensor DS18B20 .....	40
<b>Figura 13-2:</b>	Conexión de sensores de temperatura con Arduino.....	41
<b>Figura 14-2:</b>	Esquema de identificación de los sensores de temperatura .....	42
<b>Figura 15-2:</b>	Esquema para adquisición de datos .....	43
<b>Figura 16-2:</b>	Flujos de calor que inciden en la cabina del vehículo.....	44
<b>Figura 17-2:</b>	Representación de superficies de la cabina del vehículo .....	45
<b>Figura 18-2:</b>	Flujos de calor en el parabrisas .....	46
<b>Figura 19-2:</b>	Script Cabina_calor_run.m .....	50
<b>Figura 20-2:</b>	Entradas del Script Cabina_calor_run.m .....	50

<b>Figura 21-2:</b> Código para ejecutar la gráfica del modelo .....	51
<b>Figura 22-2:</b> Script <i>cabina_calor.m</i> entradas para las condiciones iniciales.....	52
<b>Figura 23-2:</b> Cálculo de temperaturas internas, externas y coeficiente de convección. ....	53
<b>Figura 24-2:</b> Ecuaciones diferenciales del modelo térmico de la cabina.....	53
<b>Figura 25-2:</b> Script para el cálculo de la temperatura de las superficies.....	54
<b>Figura 26-2:</b> Script del balance de energía en las superficies ( <i>approx.m</i> ).....	54
<b>Figura 27-2:</b> Script para el cálculo de la convección ( <i>convección.m</i> ).....	55
<b>Figura 28-2:</b> Script para el cálculo de la demanda térmica.....	55
<b>Figura 29-2:</b> Función principal para la demanda térmica.....	56

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Resultados del ensayo experimental 1 sin incidencia solar.....	58
<b>Gráfico 2-3:</b>	Resultados del ensayo experimental 2.....	59
<b>Gráfico 3-3:</b>	Resultados del ensayo experimental 3.....	60
<b>Gráfico 4-3:</b>	Temperatura ambiente e irradiación solar ensayo 3 .....	61
<b>Gráfico 5-3:</b>	Validación de la temperatura de aire interior (ensayo 1).....	62
<b>Gráfico 6-3:</b>	Validación de la temperatura de aire interior (ensayo 2).....	63
<b>Gráfico 7-3:</b>	Validación de la temperatura de aire interior (ensayo 3).....	65
<b>Gráfico 8-3:</b>	Resultado de la demanda térmica para la simulación 1 .....	66
<b>Gráfico 9-3:</b>	Resultado de la demanda térmica para la simulación 2.....	66
<b>Gráfico 10-3:</b>	Resultado de la demanda térmica para la simulación 3.....	67
<b>Gráfico 11-3:</b>	Comparación del comportamiento de la temperatura en simulación 4.....	68
<b>Gráfico 12-3:</b>	Comportamiento de la temperatura de vidrios laminados simulación 4.....	69
<b>Gráfico 13-3:</b>	Comportamiento de la temperatura para vidrios aislantes simulación 4.....	69
<b>Gráfico 14-3:</b>	Influencia de color del vehículo en la temperatura interior máxima (simulación 4).....	70
<b>Gráfico 15-3:</b>	Comparación del comportamiento de la demanda térmica en la simulación 4 .	71
<b>Gráfico 16-3:</b>	Comportamiento de la temperatura en simulación 5 .....	72
<b>Gráfico 17-3:</b>	Comportamiento de la temperatura para vidrios laminados simulación 5. ....	72
<b>Gráfico 18-3:</b>	C para vidrios aislados simulación 5.....	73
<b>Gráfico 19-3:</b>	Comparación de la influencia de color del vehículo en la temperatura interior (simulación 5).....	73
<b>Gráfico 20-3:</b>	Comparación del comportamiento de la demanda térmica en simulación 4 .....	74
<b>Gráfico 21-3:</b>	Comportamiento de la temperatura en simulación 6.....	75
<b>Gráfico 22-3:</b>	Comportamiento de la temperatura de vidrios laminados simulación 6.....	75
<b>Gráfico 23-3:</b>	Comportamiento de la temperatura de vidrios aislados simulación 6. ....	76
<b>Gráfico 24-3:</b>	Comparación de la influencia de color del vehículo en la temperatura interior (simulación 6).....	76
<b>Gráfico 25-3:</b>	Comportamiento de la temperatura en simulación 6.....	77
<b>Gráfico 26-3:</b>	Comparación de la temperatura interior en las diferentes condiciones de simulación .....	78
<b>Gráfico 27-3:</b>	Comparación de la demanda térmica interna en las diferentes condiciones de simulación. ....	79

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** PROGRAMACIÓN PARA REGISTRO DE DATOS DE LA CABINA

**ANEXO B:** PROCEDIMIENTO PARA CÁLCULO DE TEMPERATURAS

**ANEXO C:** DETERMINACIÓN DE DIRECCIÓN ÚNICA DE SENSORES

**ANEXO D:** PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE  
CONVECCIÓN

**ANEXO E:** PROPIEDADES DE DIFERENTES SUSTANCIAS

**ANEXO F:** REGISTRO FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

## NOMENCLATURA

$A$	Área de contacto	[m <sup>2</sup> ]
$A_{base}$	Área de la base	[m <sup>2</sup> ]
$A_{ceiling}$	Área de superficie del techo	[m <sup>2</sup> ]
$A_{rw}$	Área de superficie del parabrisas posterior	[m <sup>2</sup> ]
$A_{ws}$	Área de superficie del parabrisas	[m <sup>2</sup> ]
$A_{lsw}$	Área de superficie acristalada del lado izquierdo	[m <sup>2</sup> ]
$A_{rsw}$	Área de superficie acristalada del lado derecho	[m <sup>2</sup> ]
$C_{base}$	Capacidad calorífica de la base	[J/kg K]
$C_{p_{air}}$	Capacidad calorífica específica del aire	[J/kg K]
$E_{ent}$	Energía total que entra en el sistema	[J]
$E_{sal}$	Energía total que sale del sistema	[J]
$\varepsilon_{lsw}$	Emisividad de la ventana	[-]
$\varepsilon_{ws}$	Emisividad del parabrisas	[-]
$\Delta E_{sistema}$	El cambio neto en la energía total de un sistema	[J]
$e_{lsw}$	Espesor de ventanas	[m]
$e_{rw}$	Espesor del parabrisas posterior	[m]
$e_{ws}$	Espesor del parabrisas	[m]
$k$	Conductividad térmica	[W/m K]
$k_{lsw}$	Conductividad térmica ventana	[W/m K]
$k_{rw}$	Conductividad térmica del parabrisas posterior	[W/m K]
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección	[W/m K]
$h_{base}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo de la base	[W/m K]
$h_{ceiling}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo del techo	[W/m K]
$h_{lsw}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo del lado izquierdo	[W/m K]
$h_{rw}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo del lado derecho	[W/m K]
$h_{ws}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo del parabrisas	[W/m K]
$m_{air}$	Masa del aire	[Kg]
$\alpha_{base}$	Absortividad de la base	[-]
$\alpha_{roof}$	Absortividad en la superficie externa del techo	[-]
$\alpha$	Absortividad	[-]
$G$	Incidencia solar	[-]
$\varepsilon$	Emisividad	[-]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{abs}$	Radiación solar absorbida	[W/m <sup>2</sup> ]

$G_{ceilingt}$	Radiación solar	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{lswa}$	Radiación solar absorbida ventana	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{lswinc}$	Radiación solar incidente en la ventana	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{lswt}$	Radiación solar transmitida en la ventana	
$G_{roofta}$	Radiación solar absorbida del techo	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{roofinc}$	Radiación solar incidente en el techo	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{rwa}$	Radiación solar absorbida parabrisas posterior	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{rwinc}$	Radiación solar incidente del parabrisas posterior	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{rwt}$	Radiación solar transmitida en el parabrisas posterior	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{ws,a}$	Radiación solar absorbida en el parabrisas	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{ws,r}$	Radiación solar reflejada en el parabrisas	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{ws,t}$	Radiación solar transmitida en el parabrisas	[W/m <sup>2</sup> ]
$G_{wsinc}$	Radiación solar incidente en el parabrisas	[W]
$Q_{human}$	Flujo de calor generado por los pasajeros	[W]
$Q_{base}$	Flujos de calor convectivo desde la base	[W]
$Q_{cdceiling}$	Flujo de calor conductivo dentro de la superficie del techo	[W]
$Q_{ceiling}$	Flujos de calor convectivo desde el techo	[W]
$Q_{cv}$	Calor por convección	[W]
$Q_{cve}$	Flujo de calor convectivo externo	[W]
$Q_{cvroof}$	Flujo de calor convectivo entre techo y aire ambiente	[W]
$Q_{gen}$	Flujos de calor convectivo desde el calefactor	[W]
$Q_{rad}$	Calor por radiación solar	[W]
$Q_{rde}$	Flujo de calor por radiación externa	[W]
$Q_{rdroof}$	Flujo de calor por radiación entre techo y aire ambiente	[W]
$Q_{windows}$	Flujos de calor convectivo desde las superficies acristaladas	[W]
$T_{\infty}$	Temperaturas del fluido	[°C]
$T_s$	Temperaturas de la superficie	[°C]
$T_{air}$	Temperatura del aire interior de la cabina	[°C]
$T_{base}$	Temperatura de la base	[°C]
$T_{comf}$	Temperatura de confort térmico	[°C]
$T_{ceiling}$	Temperatura de superficie del parabrisas	[°C]
$T_{lsw}$	Temperatura de superficie del parabrisas	[°C]
$T_{lswe}$	Temperatura de superficie externa del lado izquierdo	[°C]
$T_{roof}$	Temperatura de superficie externa del techo	[°C]
$T_{rw}$	Temperatura de superficie del parabrisas	[°C]

$T_{rwe}$	Temperatura de superficie externa del parabrisas posterior	[°C]
$T_{ws}$	Temperatura de superficie del parabrisas	[°C]
$T_{wse}$	Temperatura de superficie externa del parabrisas externa	[°C]

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de titulación fue desarrollar un modelo térmico dinámico de la cabina de un automóvil, que permita estimar la variación de la temperatura interior para un proceso transitorio en función de las condiciones exteriores y de las distintas cargas térmicas existentes. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los diferentes modelos térmicos de cabinas en vehículos, desarrollados por distintos autores para establecer el tipo de modelo más adecuado. El modelo basó su elaboración en el método de balance de calor y se introdujo en la plataforma de programación Matlab para poder integrar las diferentes ecuaciones diferenciales de balance de energía obtenidas. El modelo fue validado a partir de ensayos experimentales, con y sin radiación solar, en los que se obtuvieron valores de RMS de 1,11 y 0,57 - 0,74 al igual que diferencias máximas de temperatura de 3,78 °C y 1.38 °C – 1,94 °C, respectivamente. También se realizó el cálculo del calor sensible para determinar la demanda térmica que necesita satisfacer el sistema de aire acondicionado, para mantener un confort térmico en el interior de la cabina. Además, se realizaron simulaciones del comportamiento de la temperatura interior en diferentes condiciones: cambiando el tipo de vidrio equipado, variando el número de ocupantes y considerando tres colores de vehículos (negro, amarillo y blanco). Los resultados muestran que las curvas de temperatura en la fase de calentamiento y enfriamiento presentan la misma tendencia para cualquier tiempo de duración en los ensayos sin incidencia solar. Al variar el color del vehículo, se determinó que los vehículos con colores oscuros absorben más calor que aquellos con colores claros. La carga térmica guarda relación con el número de pasajeros y el tipo de superficie acristalada, como el vidrio aislante contribuye a la reducción de la temperatura en la cabina.

**Palabras clave:** <MODELO TÉRMICO DINÁMICO> <BALANCE DE CALOR> <CARGA TÉRMICA> <DEMANDA TÉRMICA> <TEMPERATURA>



Firmado electrónicamente por:  
**HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA**

1940-DBRA-UPT-2021

2021-10-21

## ABSTRACT

This degree work aimed to develop a dynamic thermal model of a car cabin, which allows estimating the variation of the interior temperature for a transitory process depending on the exterior conditions and the different existing thermal loads. In the first place, it was carried out a bibliographic review of the different thermal models of cabins in vehicles, developed by various authors to establish the most suitable type of model. The model-based its elaboration on the heat balance method and was introduced in the Matlab programming platform to be able to integrate the different differential equations of energy balance obtained. The model was validated from experimental tests, with and without solar radiation, in which RMS values of 1.11 and 0.57 - 0.74 were obtained, as well as maximum temperature differences of 3.78 ° C and 1.38 ° C - 1.94 ° C, respectively. The sensible heat calculation was also carried out to determine the thermal demand that the air conditioning system needs to satisfy to maintain thermal comfort inside the cabin. In addition, simulations of the behavior of the interior temperature were carried out under different conditions. Changing the type of glass fitted, varying the number of occupants, and considering three-vehicle colors (black, yellow, and white). The results show that the temperature curves in the heating and cooling phase present the same trend for any duration time in the tests without solar incidence. By varying the color of the vehicle, it was determined that vehicles with dark colors absorb more heat than those with light colors. The thermal load is related to the number of passengers and the type of glazed surface. As well as the insulating glass contributes to the reduction of the temperature in the cabin.

Keywords: <DYNAMIC THERMAL MODEL> <HEAT BALANCE> <THERMAL LOAD>  
<THERMAL DEMAND> <TEMPERATURE>.



Firmado electrónicamente por:  
**PATRICIA PILAR**  
**MOYOTA AMAGUAYA**

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de las investigaciones dentro del sector automotriz han centrado sus esfuerzos en la movilidad y rendimiento del vehículo, los cuales son parámetros importantes al momento de conducir. Los sistemas que integran los vehículos para brindar comodidad al conductor tales como el aire acondicionado, calefacción y ventilación (HVAC) también afectan de manera directa al consumo energético del vehículo, por esta razón es importante estudiar los sistemas HVAC ya que el consumo de energía depende directamente de la carga térmica de la cabina del vehículo.

Actualmente, los sistemas HVAC buscan cumplir dos objetivos principales: proporcionar el confort térmico para los pasajeros dentro de la cabina del vehículo bajo cualquier condición climática y operativa, y, a su vez, brindar seguridad al conductor.

El objetivo de los estudios de investigación acerca de los sistemas HVAC es buscar una reducción del consumo energético del vehículo sin afectar la economía del conductor y sin causar impactos hacia el medio ambiente asociados con el tráfico vehicular. En resumen, una mejor gestión energética del vehículo se traduce en un mayor ahorro de combustible y bajos costes de funcionamiento.

Las molestias térmicas son mucho más evidentes en la cabina de un vehículo. Tomando en cuenta las condiciones ambientales externas (temperatura, sol y viento), velocidad del vehículo, temperatura de bloque de motor y número de ocupantes dentro del habitáculo, el comportamiento térmico dentro de la cabina variará en función del tiempo y también dependerá de las exigencias que el usuario requiera del sistema de climatización para crear un ambiente confortable para los pasajeros, sin embargo, esto significa un mayor impacto en el consumo de energía del vehículo y un aumento significativo de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo este sistema el segundo mayor consumidor de energía en los automóviles después del motor.

En este contexto, se ha desarrollado el presente trabajo de investigación con el fin de desarrollar un modelo que determine el comportamiento térmico del habitáculo de un vehículo bajo diferentes condiciones ambientales. En la validación del modelo se compara los datos obtenidos mediante tres ensayos experimentales (con y sin incidencia solar) con los resultados de la simulación.

## **Problema**

En la actualidad, debido a los altos índices de contaminación existentes en el mundo, la industria automotriz ha desarrollado distintas tecnologías que permiten optimizar el consumo de combustible para reducir la cantidad de emisiones contaminantes hacia el medio ambiente. De igual manera, se busca obtener un confort térmico ideal para los ocupantes de un vehículo sin que esto signifique un mayor consumo del combustible y también afecte a la economía del usuario, lo que hace necesario realizar el estudio en el sistema A/C de un automóvil.

El comportamiento térmico del vehículo repercute en el consumo energético del compresor y por ende en el consumo de combustible por el uso del sistema A/C. Este sistema necesita suministrar una capacidad frigorífica para suplir una demanda energética que a su vez depende de las diferentes cargas térmicas del vehículo. Para la evaluación integral de las cargas térmicas en la cabina de un vehículo se requiere de un modelo que reproduzca el comportamiento térmico de la cabina bajo distintas condiciones ambientales variables.

## **Justificación**

Se han desarrollado métodos diferentes de medición y evaluación de la comodidad de los espacios ocupados, involucrando variables físicas que caracterizan el entorno de un vehículo. Los estudios hasta hoy publicados se los puede dividir en dos grupos, basados en modelos de parámetros agrupados o en un análisis de dinámica de fluidos computacional CFD. Marcos et al. (2014) describen un modelo térmico de la cabina de un vehículo con mayor complejidad en la cual divide en nodos la superficie y el volumen de aire interior, donde el establecimiento del balance de calor en cada nodo se traduce en la evolución de la temperatura. Fayazbakhsh y Bahrami (2013) utilizaron un método de parámetros agrupados para estimar la carga térmica de la cabina de un vehículo.

El presente trabajo de investigación toma como referencia el modelo descrito por Marcos et al. (2014), ya que este modelo se basa en ecuaciones teóricas de balance de calor, transferencia de calor, inercia térmica y tratamiento por radiación. Los resultados obtenidos en las simulaciones del modelo son comparados con la temperatura experimental del aire al interior de la cabina del vehículo para diferentes condiciones. Dichas comparaciones demuestran la similitud entre los resultados de simulaciones y los datos reales medidos experimentalmente.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Desarrollar un modelo térmico de la cabina de un vehículo para predecir el comportamiento térmico de su estructura bajo varias condiciones ambientales exteriores

### ***Objetivos específicos***

- Implementar un modelo térmico dinámico de la cabina de un vehículo.
- Realizar medidas experimentales de temperatura interior y exterior cuando el vehículo está estacionado dentro de un garaje en el calentamiento y enfriamiento de la cabina utilizando calefactores.
- Realizar medidas experimentales de temperatura interior, exterior y radiación solar cuando el vehículo está estacionado en el exterior con incidencia de la radiación solar en el calentamiento y enfriamiento de la cabina.
- Comparar los resultados experimentales con los del modelo sobre temperatura interior de la cabina.
- Realizar simulaciones con el modelo térmico de la cabina del vehículo, cambiando varios parámetros como: condiciones ambientales, cargas térmicas, tipos de superficies opacas y acristaladas.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 1.1. Antecedentes

La temperatura de un vehículo aparcado bajo la incidencia de la radiación solar puede superar los 60 °C, esto ha sido demostrado por distintos autores, en determinados lugares y determinadas temporadas del año. (Waleed et al., 2014) demostró que en un día caluroso a una temperatura ambiente de 40 °C, la temperatura dentro del vehículo puede aumentar en 80 °C ese valor. Otros autores como (Al-Kayiem et al., 2010) y (Levinson et al., 2011a) indican que un automóvil estacionado al sol en un día de verano, la temperatura promedio dentro del este puede ser de hasta 80 °C. (Dadour et al. 2011) desarrollaron un modelo simple de invernadero y demostraron que la temperatura en la cabina de un vehículo puede ser más de 20 °C la temperatura ambiente. Cada uno de los autores desarrolló una estrategia diferente para encontrar la temperatura de la cabina con un fin determinado, lo que ha hecho importante poder determinar este valor.

(Vásconez, 2019a), en su trabajo de investigación titulado: “Desarrollo de un modelo para el cálculo del consumo de climatización en vehículos de pasajeros urbanos” calcula el consumo y las emisiones de CO<sub>2</sub> resultado del sistema de aire acondicionado. El modelo establecido abarca tres submodelos que fueron desarrollados con el software TRNSYS. El primer modelo corresponde a un modelo dinámico dentro del automóvil y estima las variaciones de temperatura y humedad del aire al interior del vehículo, en función de diversas condiciones externas y cargas térmicas. El modelo fue validado mediante pruebas experimentales, con y sin radiación solar. Su principal objetivo fue calcular la demanda de calor que debe satisfacer el sistema de climatización para mantener el interior del coche a una determinada temperatura. Este modelo tiene en cuenta los cambios en las condiciones climáticas y en la dirección que toma el vehículo mientras conduce. Según (Vásconez, 2019b), la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), propone dos procedimientos para calcular las cargas térmicas de refrigeración en edificios: el método de balance de calor y el método de series de tiempo radiante. Ambos métodos se basan principalmente en la relación entre calor y la transferencia de masa.

(Fayazbakhsh y Bahrami, 2013) mencionan que el sistema de aire acondicionado de un automóvil es un componente necesario para garantizar el confort térmico de los pasajeros al mantener la temperatura y la humedad del aire en el habitáculo. La tarea es generar suficiente capacidad de enfriamiento para compensar la carga de calor sensible y latente del vehículo. Las cargas sensibles

provocan cambios en la temperatura y las cargas latentes producen cambios en la humedad absoluta del aire.

Los autores que han realizado investigaciones acerca del comportamiento térmico de las cabinas de los vehículos, entre ellos (Levinson, et al., 2011b), han creado un modelo térmico simplificado para demostrar las ventajas de los revestimientos reflectantes (superficies de la cabina), modificando el color del objeto de estudio en el vehículo 1 de color negro, y el vehículo 2 de color blanco, lo que significó una disminución en la temperatura interior de un vehículo estacionado al sol, reduciendo la carga térmica y optimizando el combustible al poder optar por un acondicionador de aire de pequeñas dimensiones.

El hecho de exponer la cabina del vehículo a condiciones ambientales hace que el interior del automóvil se someta a un proceso de calentamiento o enfriamiento, por lo tanto, es significativo para el trabajo del sistema de aire acondicionado A/C, ya que su uso en vehículos tradicionales e híbridos requiere de una potencia extra del motor y significa una reducción en la autonomía de los vehículos eléctricos.

El uso de herramientas eficientes y confiables para el cálculo y optimización de sistemas es fundamental para su desarrollo. Los avances recientes en la potencia de cálculo de los ordenadores y el uso de métodos numéricos para la resolución de sistemas asociados a la climatización se caracterizan por exhibir una dependencia no lineal con las propiedades meteorológicas. El uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional y de simulaciones transitorias complementan idealmente a la experimentación para todos los diferentes modelos térmicos (Marcos et al., 2014a). (Marcos et al., 2014b) realizaron la validación de un modelo térmico utilizando un diseño de sistema eléctrico de sensores y el uso de la herramienta Simulink de Matlab, en el cual calcula la temperatura de la cabina por el método de parámetros agrupados. (Torregrosa-Jaime et al., 2015) también utilizó el método de parámetro agrupados en el modelo de la cabina de un vehículo, en el cual se obtiene las ecuaciones correspondientes de transferencia de calor, vinculando los parámetros requeridos para cada carga que influyen en la cabina en un periodo de tiempo limitado mientras se produce calentamiento y enfriamiento en el interior del habitáculo para dos condiciones diferentes, con y sin radiación solar, relacionando el comportamiento entre dos zonas operativas del aire acondicionado. La investigación se la realizó en un bus de pasajeros en el que se determina la zona 1 y zona 2 para conductor y pasajeros respectivamente.

## **1.2. Marco teórico**

La demanda energética del sistema A/C depende de algunos factores, como el tipo de vehículo, su tamaño, las cargas térmicas, la capacidad del equipo A/C y otros factores como patrones en la manera de conducir que determina las revoluciones del compresor, mientras que, la eficiencia del sistema A/C depende del diseño y dimensionamiento de componentes: intercambiador de calor, compresor, dispositivo de expansión, etc. (Vásconez, 2019c).

La potencia que requiere un compresor del aire acondicionado en un vehículo es significativa, pudiendo superar la potencia del motor necesaria para mover un vehículo de tamaño medio a una velocidad constante de 56 km/h, una carga de 400 W en un motor de combustión interna tradicional puede disminuir la economía del combustible en 0.4 km/L, esto a una nación como los Estados Unidos le ahorraría más de \$6 mil millones por año si todos los vehículos en este país logran ese incremento de 0.4 km/L en la economía del combustible (Farrington y Rugh, 2000a).

Según (Farrington y Rugh, 2000b), un vehículo es utilizado alrededor de unas 249 horas al año, o 41 minutos al día, los 365 días del año. Las evaluaciones de uso del aire acondicionado oscilan entre 107 y 121 horas por año o entre el 43% y 49% del uso del vehículo. Este uso varía de manera considerable dependiendo de numerosos factores tanto fuera como dentro del vehículo, factores como el clima, la hora, el día, época del año, tipo de vehículo incluido el color de este, el estacionamiento al aire libre o dentro de un garaje, la vestimenta de cada ocupante y sus niveles de actividad, la duración del viaje, la velocidad del vehículo, entre otros diferentes aspectos.

La demanda de calor del sistema de aire acondicionado depende de las condiciones ambientales como la temperatura del ambiente, la humedad relativa del aire, la radiación solar y las fuentes de calor en la cabina. Asimismo, por la ocupación o fuentes eléctricas, el proceso depende de las características de la estructura, la composición del material del vehículo y la temperatura interna requerida (Marcos et al., 2014c).

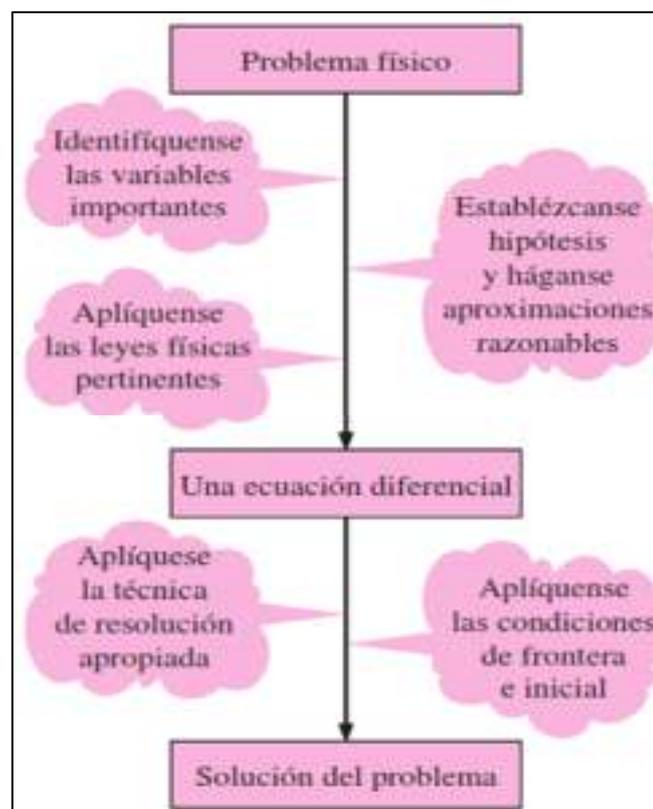
Para calcular la demanda de refrigeración, se consideran todos los flujos de energía que provocan fluctuaciones de temperatura en el automóvil. Esta demanda está en función de calor transferido a través de paredes, suelos, techos y puertas (superficies opacas), parabrisas y ventanas (superficies acristaladas), las ganancias causadas por infiltraciones y ventilación, y finalmente, las ganancias que son generadas por ocupación y equipos auxiliares (Marcos et al., 2014d).

## **1.3. Elaboración de modelos de transferencia de calor**

Las representaciones de la mayoría de los problemas científicos integran ecuaciones que relacionan cambios entre algunas variables. En general, cuanto más conservadora sea la selección

de estas variables, más amplia y precisa será la representación. En el caso de cambios minúsculos o diferenciales en las variables, se crean ecuaciones diferenciales que proporcionan fórmulas matemáticas más exactas a las leyes y estándares reales. Por lo tanto, las ecuaciones diferenciales se utilizan para estudiar una amplia variedad de temas en ciencia e ingeniería. Sin embargo, muchos de los problemas que surgen se pueden resolver sin depender de ecuaciones diferenciales y su complejidad asociada.

Existen dos etapas importantes en el estudio de los fenómenos físicos. El principal reconoce todos los factores que influyen en los fenómenos, fórmula supuestos racionales y aproximaciones y verifica las relaciones entre esas variables. Depende de las leyes y principios de la física involucrados, y el problema se formula matemáticamente. La ecuación real es excepcionalmente ejemplar porque muestra cuan dependientes son ciertos factores entre sí y la importancia general de los diversos términos. En la segunda etapa, se aborda el problema utilizando la estrategia correcta para resolverlo y se interpretan los resultados. En la Figura 1-1 se indica el proceso a seguir para la elaboración de modelos a partir de problemas físicos.



**Figura 1-1:** Modelado matemático de problemas físicos

Fuente: (Çengel, 2013)

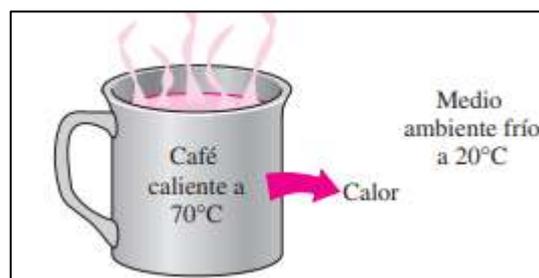
La mayoría de los procesos aleatorios que se presentan obedecen a diferentes leyes físicas. Esto permite predecir el trayecto de una situación antes de que realmente suceda, o considerar distintos

aspectos sin realizar una experimentación costosa y tediosa. De esta manera, se obtienen resultados exactos para problemas viables con mínimo esfuerzo, cuando se utilizan métodos numéricos razonables y prudentes. La formulación de este tipo de modelos necesita de información completa acerca de los fenómenos naturales implicados y las respectivas leyes. (Çengel, 2013a, p. 28)

#### 1.4. Termodinámica y transferencia de calor

El calor es un tipo de energía que se mueve de un sistema a otro debido a una variación de temperatura. La transferencia de energía ocurre consistentemente desde el medio con la temperatura más elevada hacia el de menor temperatura y este movimiento de energía se detiene cuando los dos medios llegan a una temperatura equivalente. La ciencia que identifica las diferentes razones para esa transferencia es conocida como transferencia de calor, que a diferencia de la termodinámica se encarga de los sistemas en los que hace falta el equilibrio térmico, existiendo un fenómeno de no equilibrio. Por tanto, la transferencia de calor no depende únicamente de la aplicación de las leyes de la termodinámica. Para la primera ley se requiere que la razón de la transferencia de energía hacia un sistema sea igual a la razón de incremento de la energía de ese sistema y para la segunda ley se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente (Çengel, 2013b, p. 25).

El requisito previo fundamental para el movimiento de calor es la presencia de una diferencia de temperaturas tal como se muestra en la Figura 2-1. No hay transferencia de calor entre dos medios a la misma temperatura. Esta diferencia de temperatura es la fuerza impulsora de la transferencia de calor, la velocidad de transferencia en cierta dirección depende de la medición del gradiente de temperatura.



**Figura 2-1:** Transferencia de calor

Fuente: (Çengel, 2013)

Cuanto mayor sea el gradiente de temperatura, mayor será el coeficiente de transferencia de calor. En el sector automotriz el concepto de transferencia de calor juega un papel muy importante en el diseño de varios sistemas, como los radiadores de automóviles, sistemas de calefacción y refrigeración, etc. La energía existe en varias formas: térmica y mecánica. La energía se transfiere

hacia una masa por dos mecanismos;  $Q$  calor y  $W$  trabajo, si la fuerza impulsora es una diferencia de temperatura, hablamos de un intercambio de calor, de lo contrario se conoce como trabajo (Çengel, 2013c, p. 42).

Las ramas de la termodinámica y la transferencia de calor son complementarias, la primera se ocupa de la tasa de transferencia de calor, la misma que se considera como una extensión de la termodinámica. Para muchos problemas de transferencia de calor, la primera ley de la termodinámica resulta una herramienta muy útil.

Para aplicar la primera ley de la termodinámica, se necesita definir un volumen de control, que es un área delimitada por una superficie de control que puede transferir energía. Una vez que se determina el volumen y se especifica una base temporal adecuada, existen dos opciones. Una de estas opciones intenta formular la ley de la velocidad de la energía medida en Joules por segundos, y la otra debe ser válida en cualquier instante de tiempo. Durante este período, siempre debe existir un equilibrio entre las fluctuaciones de energía medidas. De acuerdo con las formulaciones se elige la primera ley más adecuada para el análisis de la transferencia de calor. Esto significa que para un intervalo de tiempo:

*“La cantidad de energía térmica y mecánica que ingresa en un volumen de control, más la cantidad de energía térmica que se genera dentro del volumen de control, menos la cantidad de energía térmica y mecánica que sale del volumen de control debe ser igual al incremento en la cantidad de energía almacenada en el volumen de control.”* (Incropera et al., 2013, p. 29).

#### **1.4.1 Primera ley de la termodinámica**

Conocida también como principio de conservación de energía, explica que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Por tanto, cualquier cantidad de energía siendo inclusive pequeña, debe tomarse en cuenta en el curso de un proceso. El principio de balance de energía para cualquier sistema que sufre cualquier proceso se puede definir como:

*“El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso.”* (Çengel, 2013d, p. 45)

En la Figura 3-1 se define esta ley de una forma más sintetizada como:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que entra en el} \\ \text{sistema} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que sale del} \\ \text{sistema} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Cambio en la} \\ \text{energía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right)$$

**Figura 3-1:** Primera ley termodinámica

Fuente: (Çengel, 2013)

La energía puede entrar y salir de un sistema a través del calor, el trabajo y el flujo de masa, por lo que el balance de energía de un sistema que experimenta cambios de proceso se puede expresarse como:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sistema} \quad (1)$$

Donde:

$E_{ent} - E_{sal}$  = Transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa

$\Delta E_{sistema}$  = Cambio en las energías interna, cinética, potencial, etc.

### 1.5. Balance de calor en un vehículo

Distintos autores han desarrollado modelos térmicos de la cabina del vehículo, para los cuales han utilizado el método de balance de calor como parámetros agrupados, asumiendo de que la temperatura en la superficie es espacialmente uniforme en cualquier instante del proceso transitorio. Sin embargo, la mayoría de estos modelos se simplifican porque no toman en cuenta todos los flujos de calor que contribuyen al incremento de temperatura del aire en la cabina. Estos modelos permiten calcular la cantidad de energía que necesita ser removida para conservar el interior de la cabina térmicamente confortable.

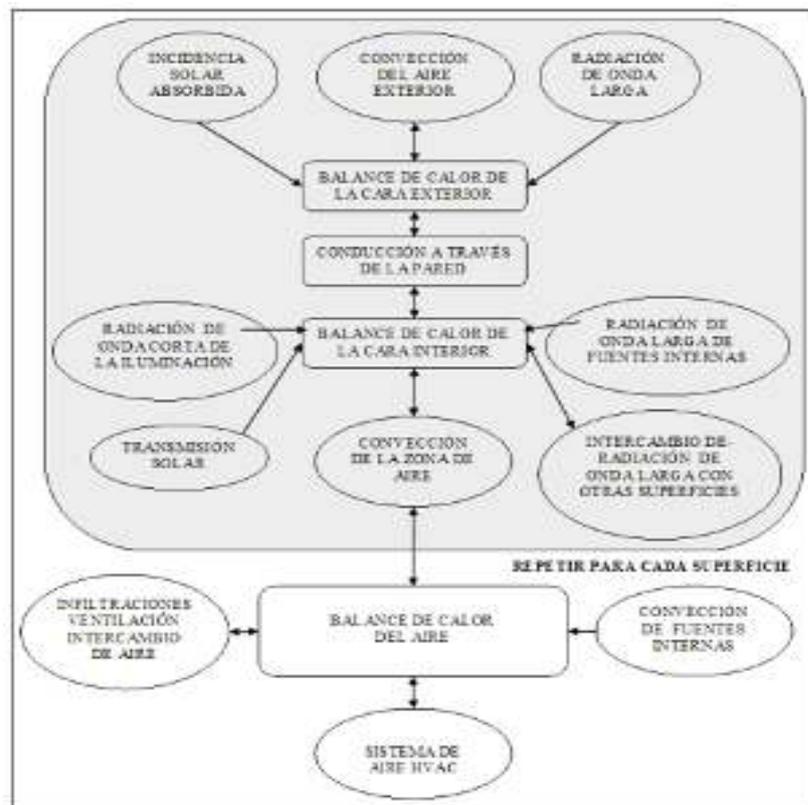
(Marcos et al., 2014e) en su estudio titulado “The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle”, proponen y validan un modelo termodinámico y simplificado para la cabina de un vehículo. El modelo desarrollado se puede utilizar para el diseño y pruebas del sistema de calefacción, ventilación y sistemas de aire acondicionado de un vehículo e investigación sobre rendimiento y consumo de combustible.

En el desarrollo del balance de calor, que utiliza ecuaciones de transferencia de calor a través de balances de energía para determinar las cargas de calor y refrigeración, incluye calcular el balance de calor por conducción, convección y radiación de superficie por superficie, para el espacio a acondicionar y un balance de calor de convección para el aire del espacio a acondicionar. El método de balance de calor resuelve el problema directamente a pesar de introducir procesos de

transformación base, permitiendo un cálculo preciso de las cargas térmicas de una zona, independientemente de la forma, ubicación y espacio a acondicionar. Este método no incluye parámetros arbitrarios y tiene la ventaja de poder calcular las cargas térmicas en tiempo real a medida que las condiciones de entrada cambian con el tiempo (Ayala y Montenegro, 2010, p. 42).

En la Figura 4-1 se detallan los cuatro procesos distintos que se analizan en el método de balance de calor:

1. Balance de calor en la superficie exterior
2. Proceso de conducción, convección y radiación en las paredes
3. Balance de calor en la superficie interior
4. Balance de calor del aire.



**Figura 4-1:** Balance de calor

Fuente: (Ayala y Montenegro, 2010)

## 1.6. Cargas o ganancias térmicas

### 1.6.1 *Ganancias de energía por conducción, convección y radiación*

Para estimar las ganancias de energía debido a la conducción, convección y radiación desde las superficies interiores hacia el aire interior de la zona se calcula la transmisión de calor de cada

superficie que compone la manta térmica. Se determina una transferencia de calor en régimen transitorio, donde se conoce la evolución de la temperatura del aire exterior y el intercambio de calor superficial se puede resumir por el coeficiente global de convección-radiación con la temperatura del aire (Conceição et al., 2018).

### ***1.6.2 Ganancias de energía a través de las superficies exteriores***

Estas ganancias se deben al efecto térmico que produce la radiación solar transmitida a través de las ventanas y al efecto indirecto de la energía solar absorbida por las superficies opacas y acristaladas. La conducción de flujos de calor a través de una pared se explica en términos de espesor, sección transversal, coeficiente de conductividad térmica, también conocido como resistencia de conducción, lo que genera que las superficies retengan calor (capacidad calorífica) y demoren el tiempo en que se producen las máximas ganancias de calor. Sin embargo, puede pasar que las paredes de un vehículo no presenten una gran inercia térmica debido al espesor del material utilizado y las propiedades de transferencia de calor (conductividad térmica, calor específico, densidad y capacidad calorífica). Además, la superficie exterior del vehículo facilita la transferencia de calor dentro del vehículo y el intercambio de calor constante, lo que resulta en un aumento instantáneo de la temperatura interior del vehículo. Las superficies acristaladas, permiten que los rayos del sol pasen directamente hacia el habitáculo, lo que contribuye a capturar el calor (Vásconez, 2019d).

Dado que el coeficiente de convección externa varía con la velocidad del aire, debido a la velocidad con la que se desplaza el vehículo durante su trayectoria, también afecta al intercambio de calor.

La tasa de radiación solar depende de la altitud, la dirección y el movimiento relativo del sol durante el día. Como resultado, la absorción de calor de la superficie del vehículo cambia a lo largo del día. Lo mismo se aplica a la transmisión directa de la radiación solar a través de una superficie transparente.

### ***1.6.3 Ganancias internas por ocupación***

Estas ganancias varían según el vehículo, ya que depende del tamaño y de las condiciones de uso que se den. Hace referencia a las cargas generadas por personas al interior del vehículo. Este valor se encuentra estandarizado (Vásconez, 2019e).

El cuerpo humano, entre muchas otras capacidades fisiológicas, requiere a menudo de energía para llevar a cabo los ciclos bioquímicos que acompañan al desarrollo de los tejidos, la actividad muscular y la transmisión de señales nerviosas. Como se sabe, para todos los efectos, toda nuestra energía proviene de los alimentos que comemos. Sin embargo, el cuerpo humano solo usa alrededor del 20% de la energía que produce para las capacidades fisiológicas. El 80% restante de la energía debe perderse en forma de calor en el medio ambiente (García, 2019a).

El ciclo que convierte los alimentos en energía útil se conoce como digestión. El calor generado por estos ciclos se llama calor metabólico. Generalmente, la generación de calor metabólico resulta de la digestión tanto basal como muscular. El primero se identifica con la energía utilizada para hacer que los compuestos intracelulares reaccionen para completar las capacidades metabólicas básicas, como la respiración y el procesamiento. En general, se trata de la generación de calor en los ciclos programados, ininterrumpidos e inconscientes del cuerpo humano. Nuevamente, la digestión muscular está determinada por la generación de calor en los tejidos musculares mientras se realiza algún tipo de trabajo real.

La tasa de exceso de calor generado por el cuerpo humano generalmente se estima en unidades Met. Esto equivale a 58 ( $W/m^2$ ) vatios por metro cuadrado de piel. Un Met aborda el nivel de movimiento de un individuo muy inmóvil. Nuestra digestión vuelve a la línea de base en reposo, generando solo 0,7 Met, pero puede superar los 10 Met cuando se realiza tareas proactivas extremadamente serias.

En lugar del Met, algunos entornos utilizan tasas de creación de calor en vatios por individuo ( $W/individuo$ ), un límite que depende de una persona adulta normal con superficie cutánea de 1,8  $m^2$ . En esta situación, otra limitación, denominada coeficiente metabólico, se utiliza a menudo en la creación de calor según lo indicado por la constitución real de los individuos. Un factor metabólico de 1,00 indica un crecimiento normal, es decir, un hombre cuya piel tiene un espacio de 1,80  $m^2$ . Para una mujer normal, generalmente se espera un factor de 0,85, mientras que para un niño normal se considera en general un factor de 0,75 (García, 2019b).

La cantidad de calor que produce el cuerpo humano depende principalmente de la digestibilidad basal y del ejercicio realizado, o digestión muscular. Los valores caloríficos de los ejercicios más comunes se presentan en la Figura 5-2 medidos en vatios por metro cuadrado de piel, Met y vatios por individuo.

Actividad	W/m <sup>2</sup>	Met	W/pers
Dormir	40	0.7	72
Estar acostado (despierto)	45	0.8	81
Estar sentado en reposo	60	1.0	108
Estar sentado con actividad ligera	64	1.1	115
Estar de pie sin movimiento	70	1.2	126
Estar de pie con actividad ligera	78	1.3	140
Estar de pie con actividad moderada (Industria ligera)	93	1.6	167
Trabajo manual ligero, cocinar	100	1.7	180
Caminar en horizontal (2 km/h)	110	1.9	198
Bailar (actividad social)	111	1.9	200
Construcción ligera	125	2.2	225
Trabajo manual moderado, ejercicio ligero	139	2.4	250
Lavar platos	145	2.5	261
Limpieza doméstica	150	2.6	270
Ejercicio moderado	167	2.9	300
Lavar a mano, planchar	170	2.9	306
Construcción moderada	180	3.1	324
Caminando en horizontal (5 km/h)	200	3.4	360
Trabajo manual pesado	235	4.1	423
Ejercicio intenso	250	4.3	450
Construcción pesada	275	4.7	495
Ejercicio y trabajo muy intensos	450	7.8	810
Correr (15 km/h)	550	9.5	990

**Figura 5-1:** Tasas de calor metabólico excedente de acuerdo con el nivel de actividad

Fuente: (García, 2019)

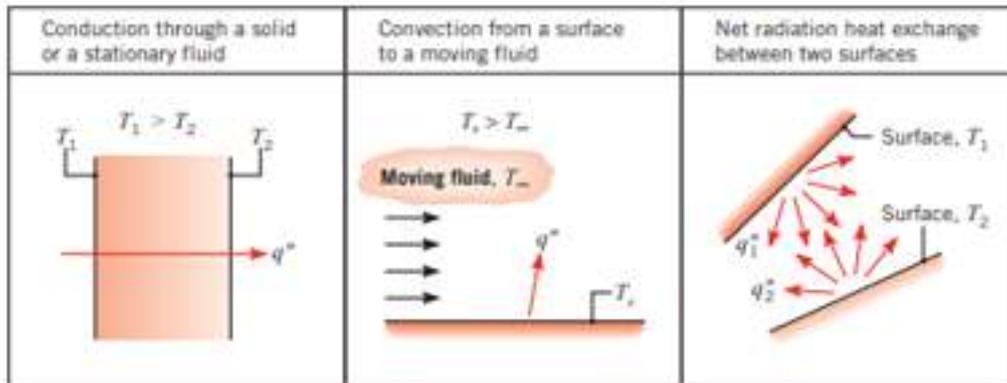
#### 1.6.4 Ganancia debido a infiltraciones

Estas ganancias se originan cuando el aire exterior ingresa a la cabina debido a la diferencia de presión y al diseño por falta de impermeabilidad entre ventanas y puertas. Para los vehículos, es difícil predecir con exactitud las infiltraciones, por lo que es necesario confiar en métodos experimentales (Vásquez, 2019f).

#### 1.7. Procesos de transferencia de calor

El calor se puede transferir de tres maneras diferentes: conducción, convección y radiación, siempre que exista una diferencia de temperatura ocurriendo siempre del medio con la temperatura más alta hacia el medio de temperatura más baja. La Figura 6-1 indica los diferentes tipos de procesos de transferencia de calor. El término *conducción* se usa para referirse a la transferencia de calor a través de un cuerpo que puede ser sólido o líquido, en un medio

estacionario donde exista un gradiente de temperatura. El proceso de *convección* alude al intercambio de calor que se producirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando estén a distintas temperaturas. El tercer proceso se denomina *radiación térmica* y se refiere a todas las superficies cuya temperatura emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. En ausencia de un medio, existe transferencia de calor por radiación entre superficies a diferentes temperaturas. (Incropera and Dewitt, 2013a, p. 2)

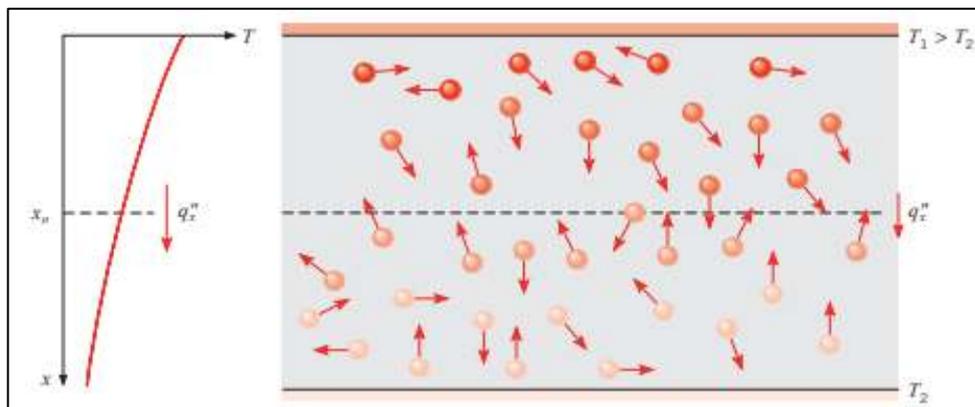


**Figura 6-1:** Procesos de transferencia de calor

Fuente: (Incropera y Dewitt, 2013)

### 1.7.1 Conducción

El proceso de transferencia de calor por conducción puede considerarse como el intercambio de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a la interacción entre ellas. Tal y como se observa en la Figura 7-1, los átomos con la energía más alta están relacionados con la temperatura más alta y al chocar entre ellas se produce una dispersión de energía hacia las partículas con menor carga, ocurriendo en la dirección de una temperatura decreciente.

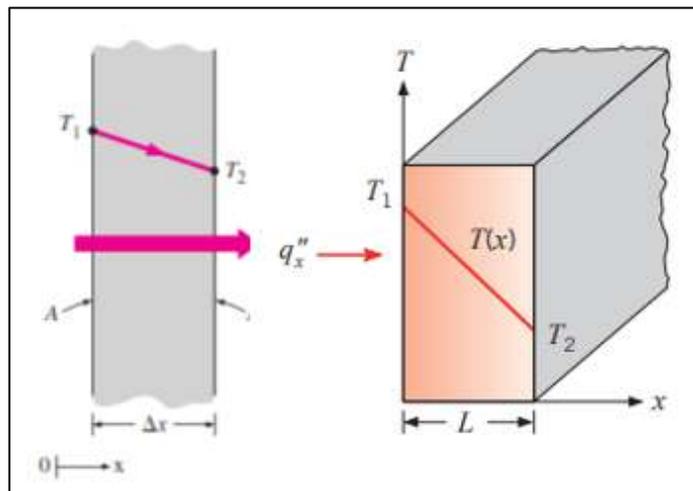


**Figura 7-1:** Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debido a la actividad molecular

Fuente: (Incropera y Dewitt, 2013)

La rapidez de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica del mismo, de su espesor y material del cual está hecho, así como la diferencia de temperaturas a través de él. Para cuantificar el proceso de transferencia de calor por conducción, la ecuación o modelo se conoce como Ley de Fourier. Para una superficie en el plano unidimensional como se aprecia en la Figura 8-1, misma que tiene una distribución de temperatura  $T(x)$  la ecuación se expresa como: (Incropera y Dewitt, 2013b, p. 21).

$$Q_c = -k * \frac{dT}{dx} \quad (2)$$



**Figura 8-1:** Transferencia unidimensional de calor por conducción.

Fuente: (Cengel, 2013)

La transferencia de calor por unidad de área es la tasa de transferencia de calor en la dirección X por unidad de área perpendicular a la dirección de transferencia y es proporcional al gradiente de temperatura  $\frac{dT}{dx}$ .  $K$ . Es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica (W/m\*K), y dicha constante es una propiedad del material de la superficie. El signo menos se debe al hecho de que el calor fluye en la dirección de la temperatura ms baja y con condiciones estables. Tal como se indica en la figura, el gradiente de temperatura se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3)$$

Para cargas de calor por conducción por unidad de tiempo a través de una pared plana con superficie, esta es la carga multiplicada por el área A (m<sup>2</sup>) del elemento estructural analizado. (Incropera y Dewitt, 2013c, p. 21)

$$Q_{cd} = -k * A * \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

### 1.7.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica  $k$  es una medida de capacidad de un material para conducir el calor, se puede caracterizar como, medida para el paso del calor que se mueve a través de una un espesor del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir el calor. Un alto valor de conductividad térmica demuestra que el material es un conductor decente de calor y un valor bajo muestra que es un aislante o un mal conductor. La Tabla 1-1 muestra las conductividades térmicas de algunos materiales normales a temperatura ambiente. (Çengel, 2013e, p. 42)

**Tabla 1-1:** Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente

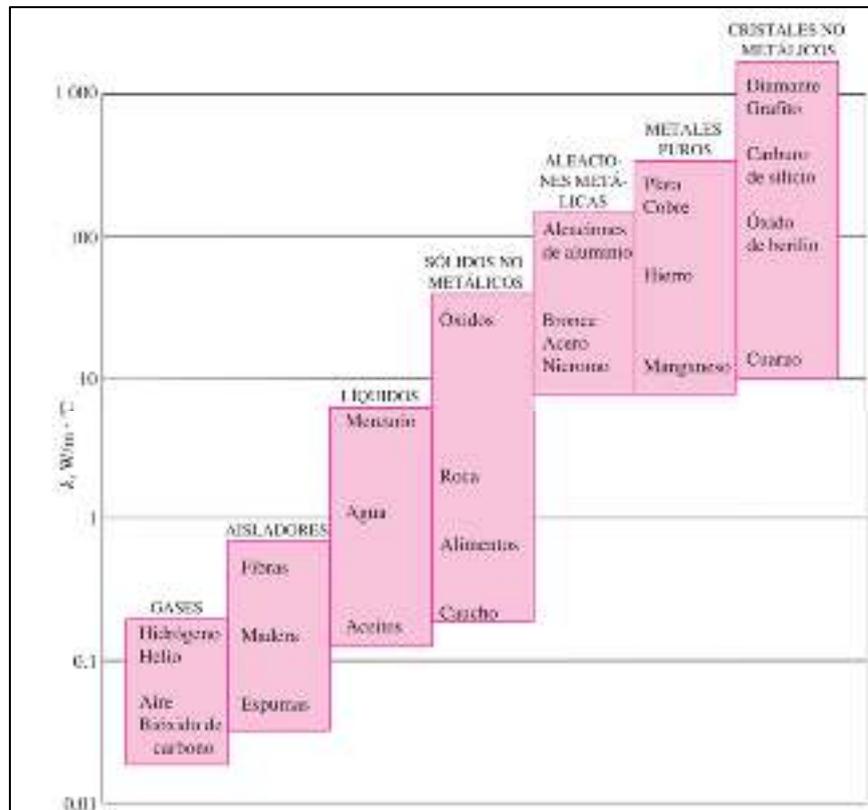
Material	k, W/m · °C*
Diamante	2300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

Fuente: (Çengel, 2013)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

La conductividad térmica del cobre no adulterado a temperatura ambiente es  $k = 401 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ , lo que muestra que una pared de cobre de 1 m de espesor conducirá el calor a un ritmo de 401 W por cada  $m^2$  por  $^\circ\text{C}$  de diferencia de temperatura a través de él. Materiales como el cobre y la plata, que son transmisores eléctricos aceptables, también son transportadores de calor y tienen altas cualidades de conductividad cálida. Los materiales como el elástico, la madera y la espuma

de poliestireno son malos conductores del calor y tienen una conductividad térmica baja. En la Figura 9-1 se observa el comportamiento térmico para diferentes materiales. (Çengel, 2013f, p. 43)

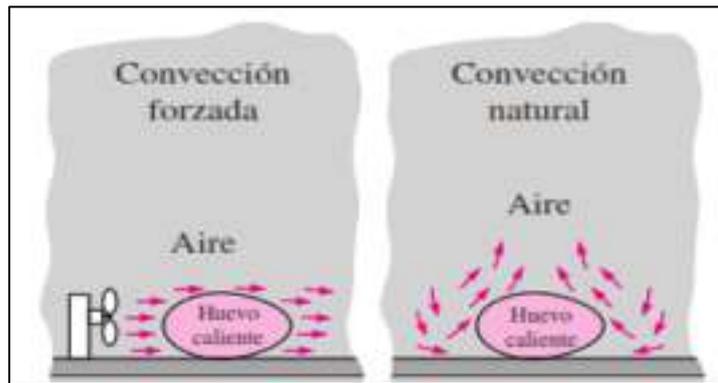


**Figura 9-1:** Conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente.

Fuente: (Çengel, 2013)

### 1.7.3 Convección

La convección es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento adyacente, que consiste en un efecto combinado de conducción y movimiento del fluido. Cuanto mayor sea la velocidad del fluido, mayor será la transferencia de calor por convección. Por el contrario, en ausencia de un movimiento masivo del fluido, la transferencia de calor es equivalente a la conducción pura. La convección forzada ocurre cuando un fluido se ve obligado a fluir sobre una superficie a consecuencia de fuentes externas como el viento, un ventilador o un soplador produciéndose corrientes de convección inducidas artificialmente. También existe una convección natural debido a la repulsión del movimiento del fluido provocada por la diferencia de densidad debido a las variaciones de temperatura en el fluido. En la Figura 10-1 se indican los dos tipos de convección con un ejemplo muy común. (Çengel, 2013g, p. 26)



**Figura 10-2:** Enfriamiento por convección forzada vs natural

Fuente: (Çengel, 2013)

Sin importar la naturaleza en el proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo se presenta de la siguiente manera:

$$Q_{cv} = h * A(T_S - T_{\infty}) \quad (5)$$

Donde  $Q_{cv}$  es el flujo de calor convectivo, que es proporcional a la diferencia entre la temperatura de la superficie y la temperatura del fluido,  $T_S$  y  $T_{\infty}$  respectivamente,  $A$  es la superficie del objeto. Esta ecuación se conoce convenientemente por la Ley de enfriamiento de Newton, donde la constante de velocidad  $h$  ( $W/m^2 \cdot K$ ), se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección y es determinado experimentalmente cuyo valor depende de cada una de las variables que impactan en la convección, como la configuración dimensional de la superficie, el movimiento del fluido, las propiedades termodinámicas y su velocidad. En la Tabla 2-1 se establecen algunos valores típicos para el coeficiente de transferencia de calor por convección. (Incropera y Dewitt, 2013d, p. 24)

**Tabla 2-1:** Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

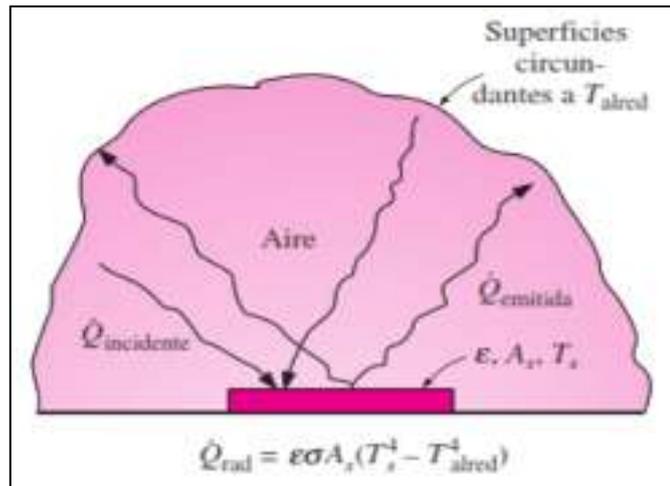
Tipo de Convección	$h$ ( $W/m^2 \cdot C$ )
Convección libre de gases	2-5
Convección libre de líquidos	10 - 1000
Convección forzada de gases	25 - 250
Convección forzada de líquidos	50 - 20000
Ebullición y condensación	2500 - 100000

Fuente: (Çengel, 2013)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 1.7.4 Radiación

El proceso de transferencia de calor por radiación es emitido por la materia en forma de ondas electromagnéticas debido a cambios en la configuración electrónica de átomos o moléculas. La transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de cuerpos en contacto como se puede observar en la Figura 11-1. Este mecanismo de transferencia es el más rápido y eficiente en vacío. De esta forma la energía del sol llega a nuestro planeta. (Çengel, 2013h, p. 27)



**Figura 11-3:** Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies a su alrededor.

Fuente: (Çengel, 2013)

La razón máxima que se puede emitir desde una superficie es expresada por la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{rad} = \epsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (6)$$

donde  $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$  W/m es la constante de Stefan-Boltzmann. La radiación también incide sobre una superficie, como una fuente especial, al igual que el sol al cual se denomina cuerpo negro, o de otras superficies en las que se expone la superficie de interés cuyo valor de *emisividad* es igual a 1 para una superficie de cuerpo negro. En la Tabla 3-1 se detallan los valores de emisividad de los materiales más comunes a partir de 300 K,

**Tabla 3-1:** Emisividad de materiales a 300 K

<b>Material</b>	<b>Emisividad</b>
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92 - 0.97
Pavimento de asfalto	0.85 - 0.93
Ladrillo rojo	0.93 - 0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82 – 0.92
Suelo	0.93 – 0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92 – 0.96

Fuente: (Cengel, 2013)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Hay que tener en cuenta que todos los cuerpos que se encuentran a una temperatura por encima del cero absoluto generan radiación infrarroja.

Otra propiedad importante de la radiación de una superficie, conocida como la velocidad a la que se absorbe la energía radiante por unidad de área, se evalúa mediante el concepto de radiactividad superficial denominado absorptividad  $\alpha$ .

$$G_{abs} = \alpha G \quad (7)$$

donde  $0 \leq \alpha \leq 1$ . En el caso de que  $\alpha < 1$  y la superficie sea opaca, se reflejará parte de la radiación. Si la superficie es traslúcida, también atravesará parte de la radiación. Es importante subrayar que el valor dependerá de la naturaleza y la superficie de la radiación. (Incropera and Dewitt, 2013e, p. 27)

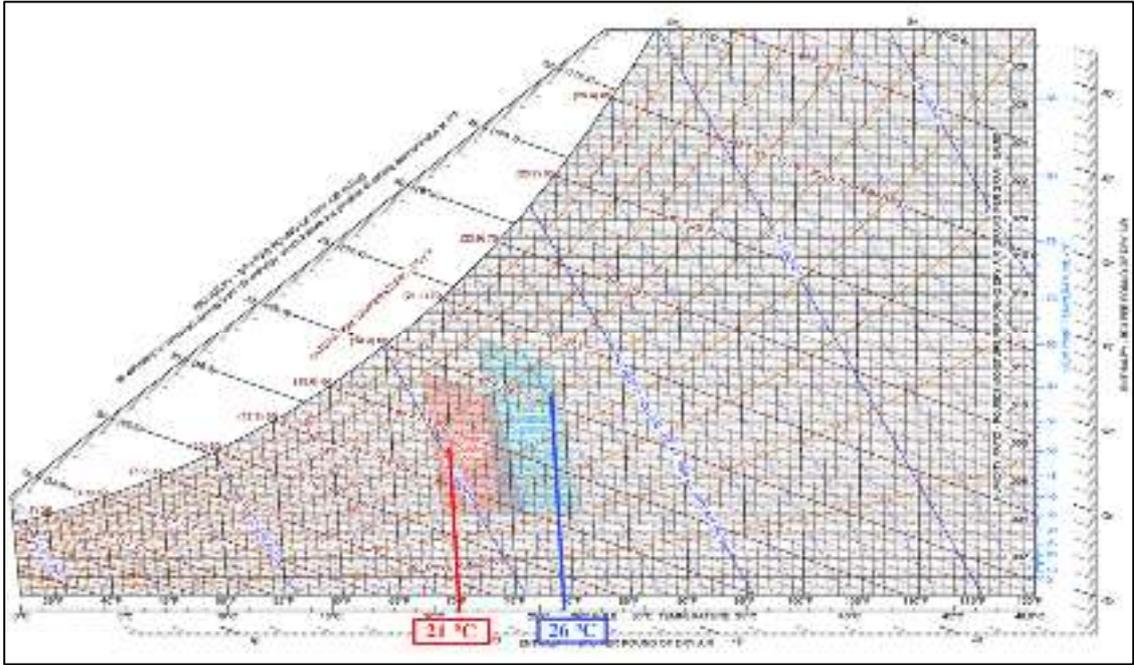
## 1.8. Confort térmico

La palabra aire acondicionado se utiliza para referirse al enfriamiento, pero su significado exacto es acondicionar el aire hasta que se mantenga en niveles óptimos de calentamiento, enfriamiento, humidificación, deshumidificación, limpieza y desodorización. El sistema A/C tiene como misión entregar un confort térmico a todos los pasajeros. Por tanto, al diseñar un sistema de acondicionamiento, es importante comprender el comportamiento térmico del cuerpo humano.

La temperatura del cuerpo humano permanece alrededor de los 37,0 °C. Esto se debe a los elevados niveles de actividad química de las células que mantienen ese valor conjunto con las actividades corporales requeridas. A este proceso se le denomina metabolismo, en el apartado de las ganancias térmicas generadas por ocupantes se muestra una tabla de índices metabólicos para diversas actividades físicas, en donde la variación de más de 5-6 °C por tiempo prolongado puede causar daños severos e incluso la muerte.

El confort humano se basa en tres factores ambientales: temperatura, humedad relativa y circulación del aire. Entre 23 °C a 27 °C se conoce como zona de confort térmico para la mayoría de las personas. La tolerancia de la humedad relativa es menos significativa ya que los límites a la que el cuerpo puede tolerar oscilan entre 20% y 75%, pero, por otro lado, el movimiento excesivo del aire produce sensación de frío y molestias no deseadas al cuerpo humano, por tanto, la velocidad del aire para minimizar las molestias debe mantenerse por debajo de 9m/min – 15m/min, en el invierno y verano respectivamente. (Çengel, 2013i, p. 65).

En la Figura 12-1 se observa un diagrama de la temperatura de confort térmico, publicado en el documento ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, en donde se distinguen dos zonas: La zona de color rojo que indica la temperatura de confort para el invierno considerando la vestimenta de la estación y la zona de color azul, que corresponde al verano generalmente con prendas más livianas. (ASHRAE, 2010)



**Figura 12-4:** Temperatura de comodidad térmica según ASHRAE 55-2010

Fuente: (ASHRAE, 2010)

### 1.9. Efecto de la radiación solar en la temperatura del vehículo.

El Real Automóvil Club de Cataluña, en colaboración con el Automóvil Club Suizo, han llevado a cabo un estudio en mayo de 2015 para determinar los riesgos que presentan las altas temperaturas al penetrar en el interior del vehículo cuando es expuesto al sol en verano. El desarrollo de esta investigación se lo realizó en el laboratorio EMPA en Zurich/Dübendorf, en una cámara de prueba capaz de mantener el control de temperatura generado por un proyector UV. Esto permite simular un día caluroso y medir con exactitud la temperatura interna y el tiempo que demora en alcanzarla.

Dicha investigación se realizó en dos autos modelo Tiguan donados por la marca Volkswagen, idénticos en características exceptuando por el color de la carrocería y la tapicería del interior. Para la elección de los colores (blanco y negro) se tomó en cuenta la diferencia significativa en la capacidad de absorción de calor por cada color. Por lo tanto, se evaluaron los efectos del color de la carrocería sobre la misma temperatura y sus posibles efectos sobre la temperatura dentro del automóvil.

También se evaluó el efecto de la visera solar colocada en el parabrisas del automóvil, y se determinó la efectividad frente al efecto de la radiación solar que ingresa al automóvil incidiendo en el cambio de temperatura, del mismo modo, también se tuvo en cuenta el efecto de mantener las ventanillas del automóvil ligeramente abiertas cuando se coloca en un estacionamiento abierto,

para respaldar la creencia general de que ayuda a reducir la temperatura dentro del automóvil. (Real Automóvil Club de Cataluña, 2015)

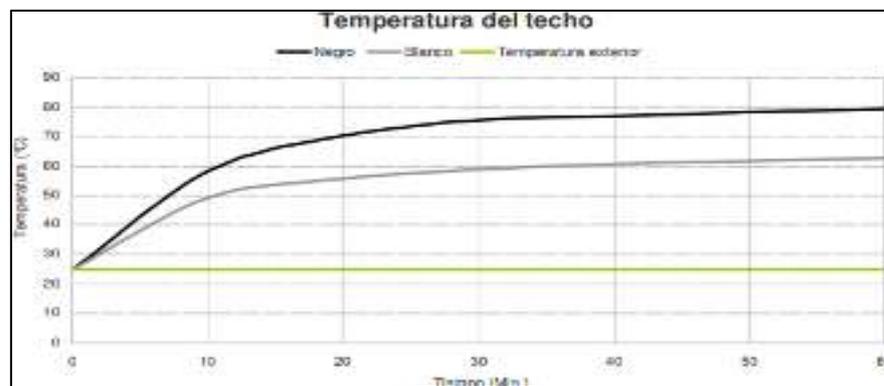
### 1.9.1 *Temperatura en la carrocería*

Se sabe que los autos pintados de colores oscuros absorben más radiación solar que aquellos con colores claros. Es la razón principal por la que los coches negros se calienten más en los días de verano, incrementando su temperatura de forma elevada en la superficie exterior.

Después de haber realizado las pruebas con los vehículos mencionados cuando fueron expuestos a la radiación solar durante una hora, se comprobó que:

- El coche negro se calienta hasta 20 °C más que el coche blanco bajo las mismas condiciones.
- La temperatura en la superficie del vehículo aumenta gradualmente hasta alcanzar su punto máximo dentro de los primeros 20 minutos de exposición.
- Durante los primeros 10 minutos de exposición a la luz solar, el coche negro logra una temperatura aproximada de 60 °C y tarda otros 50 minutos en alcanzar la temperatura máxima (80 °C). En el caso del vehículo blanco, la temperatura después de 10 minutos es de 50 °C, necesitando el tiempo restante para alcanzar su temperatura máximo de 63 °C.

La Figura 13-1 indica el comportamiento de la temperatura en la carrocería de cada vehículo a lo largo del tiempo de exposición a la radiación solar.



**Figura 13-5:** Comportamiento térmico en la carrocería según el color.

Fuente: (Real Automóvil Club de Cataluña, 2015)

## 1.10. Tipos de vidrio para vehículos

### 1.10.1 *Vidrio laminado*

Dos láminas de vidrio de cualquier espesor se unen a una película de transición de (PVB) polivinil butiral que se deriva del ácido etilvinilacetato (EVA) y tonos de luz brillante. Esta lámina, también

llamada vidrio laminado, puede ser transparente y le da al vidrio una protección evitando que éste se rompa mientras las piezas permanecen unidas al mismo. (García, 2017a)

### 1.10.2 Vidrio templado

El vidrio de seguridad templado se basa en un tratamiento combinado térmico o químico. Se refina aplicando presión en la superficie exterior y tensión en la superficie interior. Esto provoca que cuando el vidrio se rompe, se quiebre en algunos pedazos en lugar de fragmentarse. (García, 2017b)

La capacidad de estos dos métodos es brindar mayor seguridad a los ocupantes en caso de una colisión para que el vidrio no represente mayores riesgos. Los estudios sobre valoraciones térmicas en parabrisas con y sin películas de control, se han llevado a cabo para medir la cantidad de calor que se transfiere a un medio y así reducir el valor medido del calor absorbido o liberado por un sistema. Por ello es importante considerar los datos referenciados anteriormente para la realización del proyecto de investigación. Nair y Nair (1991) crearon un compuesto de láminas de vidrio automotrices SnS - CuxS. El recubrimiento se logró mediante deposiciones químicas de SnS y CuxS. La confiabilidad y el bajo costo de construcción, la excelente adherencia de las películas de SnS en sustratos de vidrio y CuxS en láminas de polímero son propiedades valiosas para la producción de láminas o diferentes tipos de vidrio de control solar para parabrisas de automóviles. (Olazo, 2012)

Las características térmicas de algunas superficies acristaladas se presentan en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1:** Propiedades de las superficies acristaladas termo físicas y ópticas

	Aire de la cavidad	Película de Control solar	Vidrio
Emisividad		-	0.85
Absortividad ( $\alpha$ )	-	00.55	0.14
Reflectividad ( $\rho$ )	-	0.26	0.08
Transmisividad ( $\tau$ )	-	0.19	0.78
Densidad ( $Kg/m^2$ )	1.2047	-	2500
Conductividad térmica ( $W/mK$ )	0.02563	-	1.4
Calor específico ( $Cp, J/KgK$ )	1004	-	750

Fuente: (Olazo, 2012)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo térmico dinámico para la cabina de un vehículo, la validación experimental del modelo y las simulaciones respectivas. La validación se ha realizado considerando 3 ensayos experimentales. El objetivo es reproducir con exactitud la temperatura del aire interior en condiciones transitorias, utilizando ecuaciones diferenciales de balance de energía aplicando conceptos de transferencia de calor.

Los datos experimentales se obtuvieron en el mes de diciembre 2020 para los ensayos 1-2 en la ciudad de Ambato, y en el mes de mayo 2021 para el ensayo 3 en la ciudad de Riobamba. Para los ensayos 1-2 el vehículo se mantuvo estacionado en el interior de un garaje, es decir, sin incidencia solar. Para el ensayo 3, el vehículo se mantuvo estacionado al aire libre bajo incidencia de la radiación solar a lo largo del día.

#### 2.1. Equipos y herramientas

##### 2.1.1 *Calefactor*

Con el fin de simular una fuente de calor para los experimentos 1 y 2, se utilizó un calefactor eléctrico que se indica en la Figura 1-2,. Las características de este generador son:

- ✓ Interruptor de vuelco de seguridad garantiza que se apague si se vuelca
- ✓ Ventilador de alta eficiencia
- ✓ Termostato regulable
- ✓ 2 configuraciones de calor y 1 configuración de solo ventilador
- ✓ Potencia 750-1500 W
- ✓ Gabinete plástico ignífugo de alto impacto
- ✓ Cuerpo aislante con manija moldeada
- ✓ Elemento de calefacción del alambre de la bobina cerrada
- ✓ Seguridad del sistema de protección de sobrecalentamiento
- ✓ Luz indicadora de encendido/apagado



**Figura 1-2:** Calefactor eléctrico 750-1500 Watts

**Realizado por:** Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Las especificaciones del equipo son detalladas en la Tabla 1-2 que se muestra a continuación:

**Tabla 1-2:** Especificaciones de calefactor COMFORT ZONE

<b>ESPECIFICACIONES CZ40BK</b>	
<b>Marca:</b>	Comfort Zone
<b>Corriente de alimentación:</b>	120 voltios
<b>Dimensiones:</b>	8-1 / 2 "x 7-1 / 2" x 11 "H
<b>Potencia:</b>	750, 1500 Watts
<b>Peso:</b>	4.1400 lb

Fuente: (Howard Berger Co., LLC, 2020)

**Realizado por:** Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### **2.1.2 Sensor de temperatura DS18B20**

El sensor de temperatura digital DS18B20, se utilizó para medir la temperatura del aire en diferentes puntos dentro de la cabina. Este sensor tiene como característica principal que se comunica a través de un bus de 1 cable que, por definición, sólo requiere una línea de datos para la comunicación con un microprocesador central, que para este trabajo se utilizó Arduino. Las aplicaciones que pueden beneficiarse de esta característica incluyen controles ambientales de HVAC, sistemas de monitoreo de temperatura dentro de edificios, equipos o maquinaria, y sistemas de monitoreo y control de procesos (Maxim integrated, 2019, p. 1).

Este tipo de sensor que se observa en la Figura 2-2 fue utilizado en los ensayos 1 y 2 con la finalidad de determinar la temperatura y su comportamiento en la cabina para posteriormente interpretar los resultados.



**Figura 2-1:** Sensores de temperatura DS18B20

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El sensor DS18B20 tiene ciertas características:

- ✓ La interfaz única de 1 cable requiere solo un puerto Pin para comunicación
- ✓ Reduce la cantidad de componentes con sensores de temperatura integrados y EEPROM
- ✓ Resolución programable de 9 bits a 12 bits
- ✓ No se requieren componentes externos
- ✓ El modo de energía parasitaria requiere solo 2 pines para operar (DQ y GND)
- ✓ Simplifica la detección de temperatura distribuida
- ✓ Cada dispositivo tiene un código de serie único de 64 bits

Las especificaciones técnicas del equipo son detalladas en la Tabla 2-3.

**Tabla 2-1:** Especificaciones del sensor DS18B20

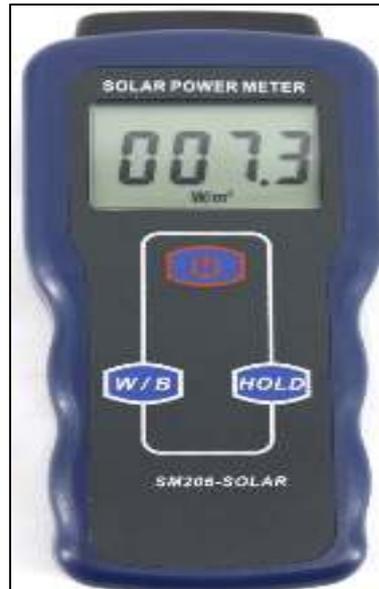
<b>ESPECIFICACIONES DS18B20</b>	
<b>Rango de voltaje en cualquier pin relativo a tierra:</b>	- 0.5V a + 6.0V
<b>Rango de temperatura de funcionamiento:</b>	-55 ° C a + 125 ° C / -67 ° F a + 257 ° F
<b>Rango de temperatura de almacenamiento:</b>	-55 ° C a + 125 ° C
<b>Precisión:</b>	± 0,5 ° C de -10 ° C a + 85 ° C
<b>Temperatura de soldadura:</b>	IPC / JEDEC Especificación J-STD-020.

Fuente: (Maxim integrated, 2019)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 2.1.3 Piranómetro

Para el ensayo 3 fue necesario medir la irradiancia solar presente en el ambiente durante la experimentación. Para realizar dichas mediciones utilizó un piranómetro MS206-SOLAR que se presenta en la Figura 3-2. El equipo fue ubicado en la parte superior del techo de la cabina de manera vertical.



**Figura 3-2:** Piranómetro SM206-Solar

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Las características que presenta el medidor de radiación solar son las siguientes:

- ✓ Seleccionable a partir de dos unidades:  $W/m^2$  y  $Btu/ft^2h$ .
- ✓ Función de retención de valor máximo.
- ✓ Retención de datos función.
- ✓ Medir directamente sin ajuste.
- ✓ Medición constante durante un período prolongado.

Las especificaciones técnicas del equipo son detalladas en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-2:** Especificaciones de medidor solar SM206-SOLAR

ESPECIFICACIONES / SM206-SOLAR	
<b>Resolución:</b>	0,1 W/m <sup>2</sup> - 0,1 Btu/(ft <sup>2</sup> -h)
<b>Rango de error:</b>	+/-10W/m <sup>2</sup> [ +/-3 Btu/(ft <sup>2</sup> -h)] o +/-5% del valor medido
<b>Error de temperatura:</b>	+/-0,38 W/m <sup>2</sup> /C [ +/-0,12 Btu/(ft <sup>2</sup> -h)/C]
<b>Pantalla:</b>	3-3/4 pulgadas LCD
<b>Valor numérico máximo mostrado</b>	3999
<b>Rango de medición:</b>	0,1-399,9 W/m <sup>2</sup> 1-3999 W/m <sup>2</sup> 0,1-399,9 Btu/(ft <sup>2</sup> -h) 1-3999 Btu/(ft <sup>2</sup> -h)
<b>Tiempo de muestreo:</b>	0,25 s/hora
<b>Temperatura y humedad de funcionamiento:</b>	0 °C a 50 °C <80% RH
<b>Temperatura y humedad de almacenamiento:</b>	-10 °C a 60 °C <70% RH
<b>Dimensiones:</b>	132 (largo) x 60 (ancho) x 38 (alto) mm
<b>Peso:</b>	Aproximado 150g
<b>Batería necesaria:</b>	Batería de 9V
<b>Duración del funcionamiento de la batería:</b>	Aproximado 100 horas

Fuente: (SM206-SOLAR)

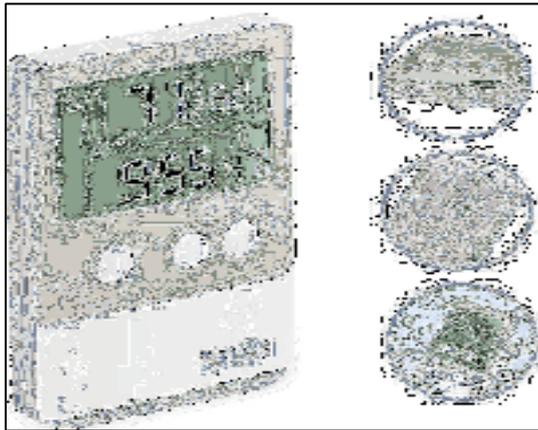
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

#### 2.1.4 *Ecovitt DS102 USB Data Logger*

Es un instrumento que permite una gran capacidad de registro de datos de temperatura y humedad en intervalos específicos que van desde una vez cada 8 segundos hasta una vez cada 4 horas. Esto permite la descarga instantánea de datos a la computadora mediante la interfaz USB, pudiéndose exportar en archivos CSV que son compatibles con programas como Excel, facilitando así la generación de gráficos para su análisis e interpretación.

Para la realización del ensayo 3 se ha optado por utilizar este equipo debido a su fácil configuración, ya que se adapta a los parámetros requeridos para el desarrollo de esta experimentación, y su interfaz gráfica permite visualizar los datos recolectados durante la prueba como se aprecia en la Figura 4-2.

Este equipo se lo ubicó entre los asientos del conductor y acompañante, con la finalidad de medir la temperatura del aire de la cabina en un punto óptimo de distribución del aire.



**Figura 4-2:** USB Data Logger modelo DS-102

Fuente: (Ecowitt, 2021)

Características:

- ✓ Mide y registra datos de temperatura y humedad
- ✓ Descarga los datos instantáneamente mediante con ordenador
- ✓ Configuración y descarga de datos mediante interfaz USB
- ✓ Fácilmente reconfigurable mediante el software incluido
- ✓ Medida seleccionable en °F o °C
- ✓ Hora, fecha y unidad sincronizadas con su PC
- ✓ Indicador de batería baja
- ✓ Resistente al agua
- ✓ Sistema operativo: Windows 7/8/10

Las especificaciones técnicas del dispositivo son detalladas en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Especificaciones Medidor de temperatura DS-102

<b>ESPECIFICACIONES DS-102</b>	
<b>Memoria:</b>	Max 20,736 registros de temperatura y humedad relativa
<b>Intervalo de registro:</b>	Desde 8 segundos hasta 4 horas
<b>Rango de temperatura de medición:</b>	-40 a 140 ° F
<b>Precisión de temperatura:</b>	+/- 1.0 ° F por debajo de 32-122 ° F
<b>Rango de humedad:</b>	10% -99% RH
<b>Precisión de humedad:</b>	+/- 4% por debajo del 20% -80%
<b>Software:</b>	Windows 7/8/10
<b>Alimentación:</b>	1 batería de 3 V
<b>Duración de la batería:</b>	1 año dependiendo de la frecuencia de muestreo y la temperatura del ambiente
<b>Dimensiones:</b>	92x62x18mm

Fuente: (Ecowitt, 2021)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

## 2.2. Caracterización del vehículo de prueba

Las variables dependientes que se determinaron son los flujos de calor que fueron considerados de acuerdo con la estructura del vehículo, los cuales dependen de las condiciones ambientales exteriores, la variación de la temperatura ambiente, condiciones de ocupación, características constructivas y geométricas del vehículo, que se consideran como las variables independientes. Las superficies del vehículo están compuestas por distintas capas de diferentes espesores, áreas y propiedades termo físicas. Se ha dividido la cabina del vehículo en superficies opacas (techo) y acristaladas (vidrios) y en superficie de la base como se menciona en la descripción del modelo. Mediante la utilización de software de diseño SolidWorks se ha reproducido las dimensiones del vehículo para poder determinar el área de las superficies del vehículo tal como se muestra en la Tabla 5-2. La validación experimental se realizó utilizando un automóvil Chevrolet Steem 4L 1997, el cual se muestra en la Figura 5-2 a continuación:



**Figura 5-2:** Vehículo de estudio

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

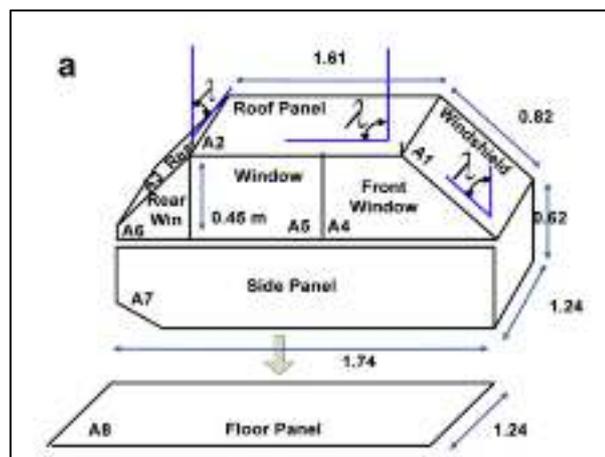
Las especificaciones técnicas del vehículo de estudio y sus dimensiones se detallan en la Tabla 5-2.

**Tabla 5-2:** Especificaciones técnicas del vehículo de prueba

CHEVROLET STEEM 97' 1.6 L					
<b>Fabricante:</b>	Suzuki	<b>Potencia Máxima:</b>	69,65 HP a 6000 rpm	<b>Longitud del vehículo:</b>	4200 mm
<b>Modelo:</b>	Esteem	<b>Torque Máximo:</b>	128,46 Nm	<b>Ancho del vehículo:</b>	1380 mm
<b>Año de fabricación:</b>	1997	<b>Máxima Velocidad:</b>	180 km/h	<b>Altura el vehículo:</b>	1380 mm
<b>Categoría:</b>	Familiar	<b>Transmisión:</b>	Manual,5 velocidades	<b>Distancia entre ejes:</b>	2490 mm
<b>Ubicación de motor:</b>	Delantero	<b>Tracción:</b>	Delantera	<b>Tipo de frenos delanteros:</b>	Discos
<b>Motor:</b>	1590 cc	<b>Número de asientos:</b>	4	<b>Tipo de frenos traseros:</b>	Tambor
<b>Tipo de motor</b>	4 en línea	<b>Espacio para pasajeros:</b>	3590 lts	<b>Número de puertas:</b>	4
<b>Válvulas por cilindro</b>	4	<b>Peso del Vehículo:</b>	740 kg	<b>Chasis:</b>	Sedán

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

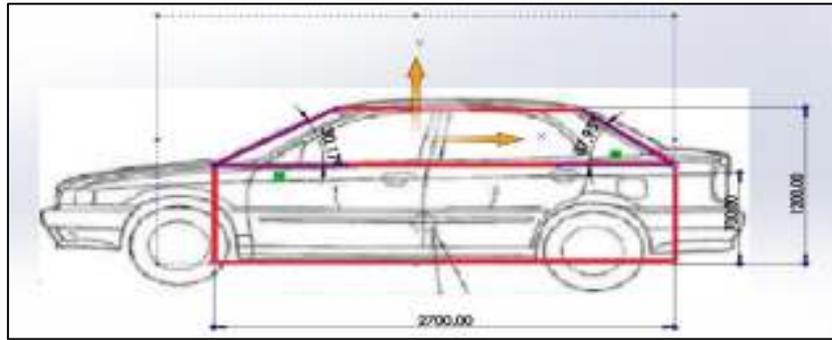
Las superficies externas fueron consideradas planas para un estudio más simplificado, tal y como se muestra en la Figura 6-2. Esto se lo ha logrado con éxito en varios modelos de cabina desarrollados como los de Khayyam et al. (2011) y Fayazbakhsh y Bahrami (2013) por citar algunos ejemplos.



**Figura 6-2:** Geometría de superficies de una cabina

Realizado por: Khayyam et al., 2011

En base a estos criterios, se realizaron las mediciones de las dimensiones de superficies opacas y acristaladas para la cabina del vehículo de estudio (ver Figura 7-2).



**Figura 7-2:** Geometría de superficies de la cabina en SolidWorks

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Los valores de las áreas, espesores y grados de inclinación de los parabrisas sobre la superficie horizontal se indican en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2:** Dimensiones de las superficies

	Superficie	Área ( $m^2$ )	Espesor (mm)	Ángulo ( $^\circ$ )
<b>Opacas</b>	Techo	1,39	-	0
	Suelo	4,05	-	0
	Derecha	0,97	-	90
	Izquierda	0,97	-	90
<b>Acrystaladas</b>	Derecha	0,48	3,48	60
	Izquierda	0,48	3,48	60
	Frontal	0,68	5,76	30
	Posterior	0,628	5,76	38

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Los materiales que componen las superficies son de vital importancia debido a las propiedades termo físicas que poseen, las cuales se describen en la Tabla 7-2.

**Tabla 7-2:** Materiales en las superficies de la cabina.

Superficie	Materiales	Espesor (m)	Conductividad ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
<b>Techo</b>	Poliuretano	0,004	0,028
	Panel de madera	0,01	0,12
	Acero	0,003	50,2
<b>Suelo</b>	Cloruro de polivinilo	0,00216	0,16
	Poliéster	0,0028	0,03
	Filtro prensado multifibra	0,00372	0,2
	Acero	0,0023	50,2

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 2.3. Escenarios experimentales

Las pruebas experimentales permitirán validar el modelo térmico del vehículo. La Tabla 8-2 detalla las condiciones, el objetivo, la duración, la instrumentación y variables a medir para cada experimento.

**Tabla 8-2:** Descripción de los ensayos y equipos de medición

	<b>Experimento 1</b>	<b>Experimento 2</b>	<b>Experimento 3</b>
<b>Condiciones</b>	Sin incidencia solar	Sin incidencia solar	Bajo incidencia solar
<b>Objetivos</b>	-Obtener la temperatura del aire interno -Observar el comportamiento de la temperatura	-Obtener la temperatura del aire interno -Observar el comportamiento de la temperatura	-Obtener la temperatura del aire interno -Medir la irradiación solar. -Observar el comportamiento de la temperatura.
<b>Duración (h)</b>	4	5	7
<b>Instrumentos</b>	DS18B20 Arduino Mega 2560 Calefactor	DS18B20 Arduino Mega 2560 Calefactor	DS18B20 Arduino Mega 2560 Piranómetro MS206 Ecowitt
<b>VARIABLES medidas</b>	Temperatura del aire interior de la cabina del vehículo y la temperatura exterior del ambiente	Temperatura del aire interior de la cabina del vehículo y la temperatura exterior del ambiente	Temperatura del aire interior de la cabina del vehículo y la temperatura exterior del ambiente. Incidencia solar,
<b>Fecha</b>	15/12/20	15/12/20	12/05/21
<b>Ubicación</b>	Ambato	Ambato	Riobamba

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

#### 3.3.1 Ensayo experimental 1 (sin incidencia solar)

Los ensayos 1-2 se llevaron a cabo en el interior de un garaje cerrado para que no exista incidencia de la radiación solar. Se utilizó un generador de calor (calefactor) para incrementar la temperatura

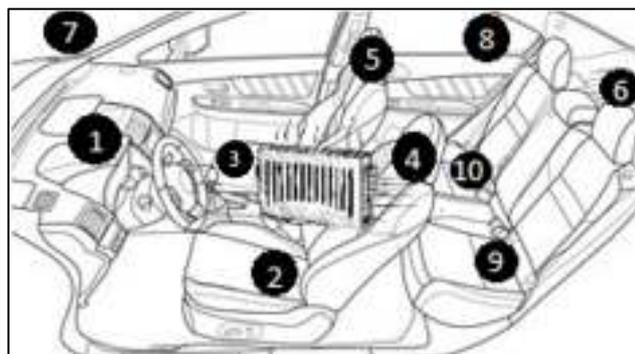
interna del vehículo durante un tiempo determinado, para posteriormente registrar el comportamiento térmico de la cabina durante el periodo de calentamiento y enfriamiento. El calefactor eléctrico tiene una potencia de 750 kW, el cual se colocó en el centro de la cabina del vehículo como se indica en la Figura 8-2.



**Figura 8-2:** Ubicación de calefactor en el interior del vehículo

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

En la Figura 9-2 se aprecia la ubicación de los sensores dentro de la cabina. Se instalaron 9 termopares ubicados de la siguiente manera: en la zona de pasajeros y conductor 6 termopares (2, 3, 4, 5, 9,10) que permiten medir la temperatura de las masas interiores de los asientos y a la altura de la cabeza. Para medir la temperatura en las zonas de los parabrisas frontal y posterior se colocaron un termopar (1,6) respectivamente. En el techo de la cabina se colocó un termopar (8) y un único termopar para medir la temperatura ambiente en el exterior de la cabina (7).



**Figura 9-2:** Esquema de ubicación de sensores de temperatura

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El ensayo experimental 1 tuvo una duración de 180 minutos divididos en dos fases. La fase de calentamiento consistió en dejar encendido el calefactor durante 120 minutos para luego apagarlo;

la fase de enfriamiento se desarrolló durante los 60 minutos restantes con el generador apagado. Se registró el comportamiento de la temperatura del aire interior de la cabina, en el intervalo de tiempo establecido.

En la Figura 10-2 se observa una foto demostrativa del vehículo estacionado al interior de un garaje para evitar la incidencia de la irradiancia solar en los ensayos experimentales 1 y 2.



**Figura 10-2:** Vehículo al interior de un garaje sin incidencia solar

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### **2.3.2** *Ensayo experimental 2 (sin incidencia solar)*

Así mismo, el ensayo experimental 2, replica el mismo procedimiento del ensayo experimental 1, pero con un tiempo de duración de 300 minutos divididos en dos fases. La fase de calentamiento con el calefactor encendido durante 180 minutos y la fase de enfriamiento durante los 120 minutos restantes con el calefactor apagado. Este ensayo se lo realizó a fin de analizar el comportamiento de la temperatura en la cabina del vehículo para un tiempo de uso más prolongado del calefactor y determinar si existen diferencias significativas con los valores obtenidos en el ensayo 1.

### **2.3.3** *Ensayo experimental 3 (con incidencia solar)*

En este escenario, el automóvil se mantuvo estacionado a la intemperie y con el frente en dirección Este. La duración de este ensayo fue de 7 horas. El objetivo de este ensayo experimental fue registrar el comportamiento de la temperatura del aire al interior de la cabina, cuando el vehículo se encuentra bajo la incidencia de la radiación solar y a temperatura ambiente. Para el registro de datos de temperatura se utilizó un DataLogger DS102, el cual fue programado para registrar datos de temperatura en el interior de la cabina cada 2 minutos. Adicionalmente se dispuso del equipo SM206-SOLAR que fue colocado en la parte superior central del techo, tal como se indica en la Figura 11-2; permitiendo así la toma de medidas de irradiancia solar global sobre superficie

horizontal que se presentó durante el tiempo de experimentación a lo largo del día. Por otro lado, se utilizó un sensor para registrar el comportamiento de la temperatura ambiente. Este ensayo experimental se llevó a cabo en la ciudad de Riobamba.



**Figura 11-2:** Ubicación del equipo SM206-SOLAR para la medición de la irradiación solar

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

## **2.4. Análisis del comportamiento térmico del vehículo**

El comportamiento térmico del vehículo se analizó a través de simulaciones en las cuales se variaron diferentes parámetros: condiciones ambientales, cargas térmicas, tipos de superficies opacas y acristaladas. En la Tabla 11-2 se describen los parámetros aplicados para las simulaciones 4,5 y 6.

### **2.4.1 Condiciones ambientales**

Se tomó las diferentes condiciones ambientales medidas en los experimentos 1, 2 y 3 realizados en la ciudad de Ambato y Riobamba.

### **2.4.2 Cargas térmicas**

Las cargas térmicas que se aplicaron son las generadas por los ocupantes en el interior del vehículo. En la simulación se tomó en cuenta 1, 2 y 5 ocupantes. De acuerdo con la Figura 5-2, el valor de calor generado que se toma es de  $64 \text{ W/m}^2$ , considerando a todos los ocupantes sentados con actividad ligera.

### 2.4.3 Tipos de superficies opacas

Los parámetros por modificar de las superficies opacas son el color de pintura del vehículo. Como se ha indicado en la revisión bibliográfica, hay estudios en los que se demuestra que el color de la cabina afecta directamente a la carga generada por la radiación solar. El coeficiente varía con relación al color utilizado, las simulaciones se realizaron con pintura color negro, blanco, y amarillo. Las propiedades térmicas de las superficies opacas se indican en la Tabla 9-2.

**Tabla 9-2:** Propiedades superficies opacas

Color	Emisividad	Absortancia	Reflectancia
C1 Negro	0.83	0.8	0.05
C2 Blanco	0.79	0.23	0.58
C3 Amarillo	0.80	0.5	0.3

Fuente: (Levinson et al., 2011;(ASHRAE Standard, 2004)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 2.4.4 Tipos de superficies acristaladas

En el mercado automotriz existen varios tipos de acristalamientos como láminas de seguridad solar, polarizados, vidrios laminados y templados tratados térmicamente para reducir su conductividad térmica o cualquier propiedad específica que el usuario necesite.

Para la simulación del modelo utilizaremos las propiedades de Emisividad  $\epsilon$ , Absortividad  $\alpha$ , Reflectividad  $\rho$ , Transmisividad  $\tau$ , que tiene un vidrio aislante (VA) con película de control solar y un vidrio laminado normal (VL) cuyos valores se indican en la Tabla 10-2.

**Tabla 10-2:** Propiedades superficies acristaladas

Vidrio	Emisividad $\epsilon$	Absortividad $\alpha$	Reflectividad $\rho$	Transmisividad $\tau$
Laminado	0.85	0.14	0.08	0.78
Aislante	-	0.55	0.26	0.19

Fuente: (Olazo, 2012)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

## 2.5. Condiciones para las simulaciones

La Tabla 11-2 muestra las condiciones en las que se realizan las diferentes simulaciones y los parámetros que se definieron de acuerdo con los valores descritos anteriormente.

**Tabla 11-2:** Condiciones de simulación

Parámetros	Condiciones ambientales	Cargas térmicas	Superficies opacas	Superficies acristaladas
Simulación 4	Experimento 3	1 pasajero	C1 C2 C3	VL-VA
Simulación 5	Experimento 3	2 pasajeros	C1 C2 C3	VL-VA
Simulación 6	Experimento 3	5 pasajeros	C1 C2 C3	VL-VA

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

## 2.6. Recolección de datos

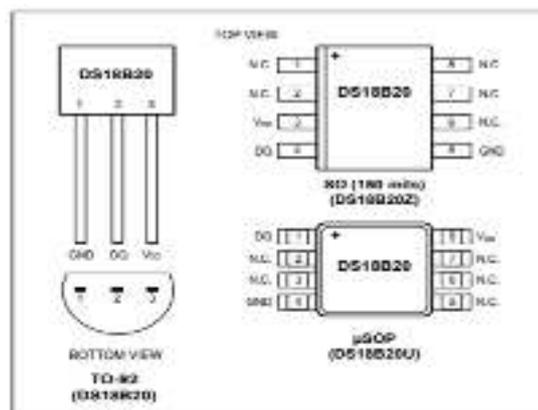
La recolección de datos se realizó mediante programación de sensores de temperatura. Para ello se utilizaron los sensores DS18B20. Esta adquisición de datos se desarrolló en diferentes partes: Primero, se identifica cada sensor de temperatura, ya que trabajan con un protocolo One-wire, o de un solo cable, característica de sensores digitales. (ver ANEXO A)

Para la programación del sistema, se toma como referencia la programación realizada por Del Valle (2016) que propone una programación soportada por librerías Arduino (ver ANEXO B)

### 2.6.1 Conexiones del sensor de temperatura DS18B20 con Arduino.

La distribución que muestran los sensores siempre dependerá del encapsulado, en cualquier caso, encontraremos tres pines, un pin para alimentación  $V_{DD}$ , un pin para tierra GND y un pin para transmisión de datos DQ. (del Valle, 2016)

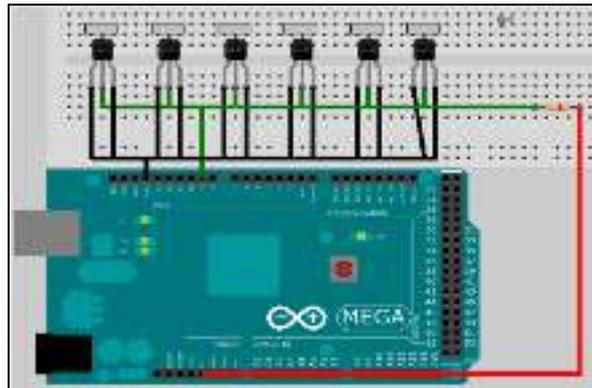
La Figura 12-2, muestra los diferentes tipos de sensores DS18B20 que se pueden encontrar, en este trabajo se ha seleccionado los sensores tipo transistor de 3 pines, que cumplen los requerimientos necesarios para la adquisición de datos.



**Figura 12-2:** Configuraciones del sensor DS18B20

Fuente: (Maxim integrated, 2019)

Para la configuración de la alimentación de Arduino, en base a las características del sensor, se utilizó la configuración denominada “modo de alimentación parásito” mediante el pin DQ. El esquema de conexión para Arduino Mega se representa en la Figura 13-2.



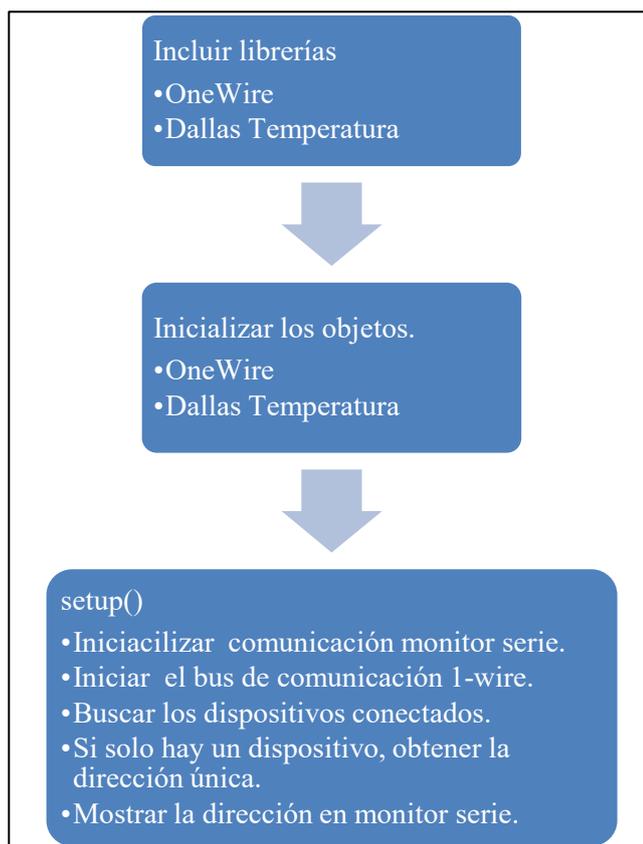
**Figura 13-2:** Conexión de sensores de temperatura con Arduino.

**Realizado por:** Trujillo, J.; Machado, C. 2021

En el circuito, se establece utilizar 10 sensores y la adquisición de datos de estos se realiza por su dirección de 64 bits, que es una característica de los sensores de temperatura, y se usa esta dirección para establecer la comunicación con cada sensor que se encuentre conectado al bus.

### **2.6.2** *Identificación de los sensores de temperatura*

La identificación de los sensores se realizó con el objetivo de establecer cuál es el sensor correcto para las diferentes ubicaciones al interior de la cabina. Los sensores de temperatura se pueden comunicar por una red bus llamada 1-Wire, para lograr establecer la conexión, es necesario que se identifiquen las direcciones de cada sensor con la ayuda de Arduino. En base a la programación establecida por Del Valle (2016), se determinó la dirección única de cada sensor como se muestra en la Figura 14-2.



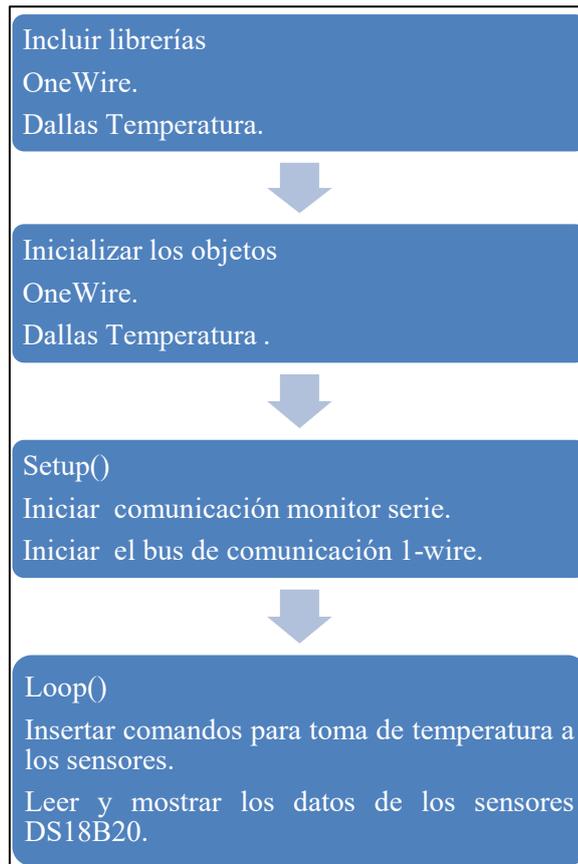
**Figura 14-2:** Esquema de identificación de los sensores de temperatura

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Una vez ejecutado el código con cada sensor y comprobar que las conexiones están realizadas de forma correcta, en el monitor serie de Arduino encontramos la información de la dirección única de cada sensor de temperatura, cabe recalcar que este procedimiento es individual para cada sensor. En el Anexo A se indica el código realizado y las direcciones encontradas para cada sensor.

### 2.6.3 *Adquisición de datos de sensores mediante su dirección única.*

El desarrollo de la programación para la adquisición de datos se representa mediante un esquema en la Figura 15-2, que se realizará una vez instaladas las librerías y determinada la dirección única de los 10 sensores de temperatura.



**Figura 15-2:** Esquema para adquisición de datos

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El código de programación establecido para la lectura de las temperaturas dentro de la cabina se muestra en el ANEXO C.

## 2.7. Descripción del modelo termodinámico del vehículo

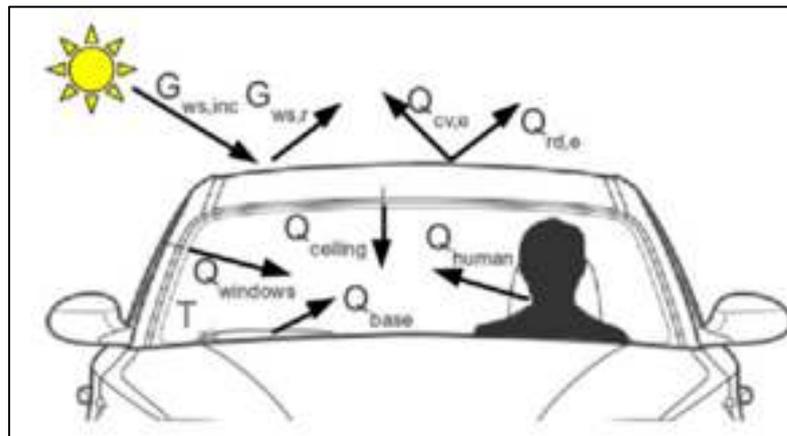
El método de balance de calor es un método directo y riguroso que utiliza ecuaciones de transferencia de calor a través de balances de energía. Este método describe la conversión de las ganancias térmicas instantáneas en cargas térmicas dentro de la zona, considerando todos los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección, radiación y la inercia térmica de los cerramientos. El balance de calor se compone de cuatro procesos: balance de calor en las superficies exteriores, proceso de conducción a través de las paredes de la zona, balance de calor en las superficies internas y el balance de calor del aire interior (Vásquez, 2019, p. 35).

De acuerdo con (Marcos et al., 2014) se tienen dos ecuaciones diferenciales, la primera ecuación diferencial se utiliza para determinar la temperatura del aire (véase ecuación 8) y la segunda

ecuación diferencial es la que se utiliza para determinar la temperatura de la base (véase ecuación 9).

La variación en la temperatura del aire interior se calcula mediante las ecuaciones de balance de calor, para este trabajo de titulación se opta por las ecuaciones propuestas por Marcos et al. (2014), tomando en cuenta los flujos de calor como se indican en la Figura 16-2 que inciden en la variación térmica de la cabina.

$$m_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot \frac{dT_{air}}{dt} = Q_{windows} + Q_{ceiling} + Q_{base} + Q_{human} + Q_{gen} \quad (8)$$



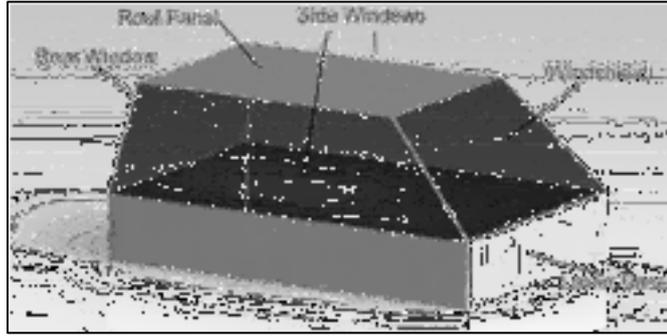
**Figura 16-2:**Flujos de calor que inciden en la cabina del vehículo

Fuente: (Marcos et al., 2014)

Donde  $m_{air}$  y  $C_{p_{air}}$  son la masa del aire y calor específico del aire interior,  $T_{air}$  es la temperatura del aire interior,  $Q_{windows}$ ,  $Q_{ceiling}$ ,  $Q_{gen}$ ,  $Q_{human}$  y  $Q_{base}$ ; son los flujos de calor convectivo entre el aire interior y las superficies de la cabina.

La base inferior de la cabina representa el tablero, los asientos y demás superficies que entran en contacto con el aire interior. El área de la superficie base es la suma de las áreas de todos los elementos considerados, todas las superficies se suponen como planas para facilitar el cálculo del coeficiente de transferencia de calor convectivo tal como se muestra en la Figura 17-2.

En la transferencia de calor convectivo desde las ventanas, se tienen en cuenta cuatro superficies diferentes: el parabrisas ( $w_s$ ), la ventana trasera ( $r_w$ ), las ventanas laterales izquierda ( $l_{sw}$ ) y derecha ( $r_{sw}$ ).



**Figura 17-2:** Representación de superficies de la cabina del vehículo

Fuente: (Marcos et al., 2014)

La base inferior se supone adiabática, lo que significa que no existen pérdidas de calor de la base con el ambiente y solo recibe energía del aire; la radiación y esta energía del aire es usada para calentar la temperatura de la base.

$$C_{base} \cdot \frac{dT_{base}}{dt} = \alpha_{base} \cdot (A_{ws} \cdot G_{wst} + A_{rw} \cdot G_{rwt} + 2A_{lsw} \cdot G_{lswt} + A_{ceiling} \cdot G_{ceilingt}) - Q_{base} \quad (9)$$

$$Q_{base} = h_{base} \cdot A_{base} \cdot (T_{base} - T_{air}) \quad (10)$$

La radiación transmitida desde las paredes y techo se calcula con las ecuaciones 11 a la 14, en donde  $\tau_{ws}$  es el coeficiente de transmisividad que tiene el parabrisas, esta propiedad es particular de cada material y esto se realiza para cada superficie.

$$G_{wst} = \tau_{ws} \cdot G_{wsinc} \quad (11)$$

$$G_{rwt} = \tau_{rw} \cdot G_{rwinc} \quad (12)$$

$$G_{lswt} = \tau_{lsw} \cdot G_{lswinc} \quad (13)$$

$$G_{ceilingt} = \tau_{ceiling} \cdot G_{roofinc} \quad (14)$$

La transferencia de calor convectivo desde las ventanas se calcula utilizando las siguientes ecuaciones:

$Q_{windows}$  se calcula como:

$$Q_{windows} = Q_{ws} + Q_{rw} + Q_{lsw} + Q_{rws} \quad (15)$$

$$Q_{ws} = h_{ws} \cdot A_{ws} \cdot (T_{ws} - T_{air}) \quad (16)$$

$$Q_{rw} = h_{rw} \cdot A_{rw} \cdot (T_{rw} - T_{air}) \quad (17)$$

$$Q_{lsw} = h_{lsw} \cdot A_{lsw} \cdot (T_{lsw} - T_{air}) \quad (18)$$

$$Q_{ceiling} = h_{ceiling} \cdot A_{ceiling} \cdot (T_{ceiling} - T_{air}) \quad (19)$$

Donde:

$h$  es el coeficiente de transferencia de calor convectivo

$T$  es la temperatura de las superficies y del aire interno

$A$  es el área de las superficies

La transferencia de calor desde las puertas se considera insignificante en comparación con la transferencia de calor desde las ventanas. (Marcos et al., 2014)

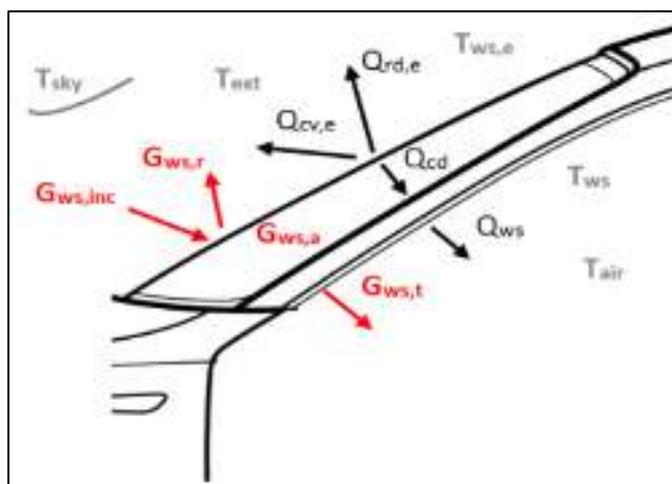
Puede suponerse que RSW y LSW son equivalentes y no hace falta diferenciar el cálculo. De esta forma la ecuación 15 queda de la siguiente manera :

$$Q_{windows} = Q_{ws} + Q_{rw} + 2Q_{lsw} \quad (15)$$

Para obtener la temperatura de las superficies de las ventanas, se realizan balances de calor que se describen mediante las ecuaciones (20) y (22).

Estos balances de calor en el parabrisas se producen de igual manera en todas las superficies acristaladas, ventana trasera y las ventanas laterales son similares. Los flujos de calor que inciden en la superficie acristalada se muestran en la Figura 18-2.

El calor generado por la incidencia solar que absorbe al parabrisas es transmitido por conducción a través del vidrio que es intercambiado por convección con el aire al interior de la cabina. En base a lo que afirma (Marcos et al., 2014), se genera el balance de calor en las superficies, donde se permite encontrar las temperaturas interna y externa.



**Figura 18-2:** Flujos de calor en el parabrisas

Fuente: (Marcos et al., 2014)

Para calcular la temperatura del parabrisas se resuelve las siguientes ecuaciones:

$$Q_{cve} + Q_{rde} = Q_{cd} + A_{ws} \cdot G_{wsa} \quad (20)$$

$$Q_{cd} = Q_{ws} \quad (21)$$

$$G_{wsa} = \alpha \cdot G_{wsinc} \quad (22)$$

Donde:

$Q_{cve}$  es el flujo de calor convectivo externo,  $Q_{rde}$  es el flujo de calor por radiación y  $Q_{cd}$  es el flujo de calor conductor dentro de la ventana. La irradiancia solar incidente ( $G_{ws,inc}$ ) se descompone en tres términos: irradiancia solar reflejada ( $G_{ws,r}$ ), absorbida ( $G_{ws,a}$ ) y transmitida ( $G_{ws,t}$ ).

Los flujos de calor que se genera en la superficie del parabrisas se calculan utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Q_{cve} = h_e \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse} - T_{ext}) \quad (23)$$

$$Q_{rde} = \varepsilon_{ws} \cdot \sigma \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse}^4 - T_{sky}^4) \quad (24)$$

$$Q_{cd} = \frac{k_{ws} \cdot A_{ws}}{e_{ws}} \cdot (T_{wse} - T_{ws}) \quad (25)$$

Donde  $T_{ext}$  es la temperatura del aire ambiente y  $T_{sky}$  es la temperatura equivalente al cielo

El coeficiente de transferencia de calor convectivo externo es  $h_e$ . Las propiedades de las ventanas son: área ( $A$ ), espesor ( $e$ ), conductividad térmica ( $k$ ), emisividad de onda larga ( $\varepsilon$ ), reflectividad ( $r$ ), absorptividad ( $a$ ) y transmisividad ( $t$ ). La constante Stefan Boltzmann es ( $\sigma$ ).

### 2.7.1 Procedimiento para el cálculo de temperaturas de superficies

El cálculo de las temperaturas de la superficie externa e interna es un proceso complicado, debido a que la radiación tiene sus variables elevadas a la cuarta potencia y se requiere de un método numérico para su solución; esto se realiza para cada superficie y para cada instante de tiempo por lo cual hace necesario el uso de un solucionador como es Matlab para esto se realiza el cálculo de  $Q_{ws}$  mediante un algoritmo iterativo, y se sigue una serie de pasos hasta encontrar su solución.

paso 0: Se conoce  $T_{air}$  supuesta.

paso 1: Calculamos  $G_{wsa}$  usando datos experimentales

paso 2: Calculamos  $T_{ws}$  aproximado suponiendo que  $T_{wse} = T_{ws}$   $Q_{cve} + Q_{rde} = Q_{cd} + A_{ws} \cdot G_{wsa}$

En este instante la temperatura no hay manera de despejar porque esta elevada a la cuarta potencia.

paso 3: Se calcula  $Q_{ws}$  usando  $Q_{ws} = h_{ws} \cdot A_{ws} \cdot (T_{ws} - T_{air})$

paso 4: Recalculamos  $T_{wse}$  usando  $Q_{cve} + Q_{rde} = Q_{cd} + A_{ws} \cdot G_{wsa}$

paso 5: Recalcula  $T_{ws}$  usando  $Q_{cd} = \frac{k_{ws} \cdot A_{ws}}{e_{ws}} \cdot (T_{wse} - T_{ws})$

paso 6: volver al paso 3 hasta que converja

La iteración finaliza cuando la temperatura supuesta de la superficie converge con un error del 0.10%. Como se observa en el ANEXO D, la temperatura encontrada en nuestras dos últimas iteraciones, tienen valores casi iguales, con lo que demostramos la obtención de la temperatura de la superficie del parabrisas ( $Ws$ ).

Este procedimiento es complejo y demanda de mucho tiempo por lo que se plantea realizar la simulación mediante el uso del software Matlab y debe usarse para las otras tres superficies (dos lados y techo)

Para calcular la temperatura del parabrisas posterior se utilizan las ecuaciones 26 a la 31:

$$Q_{cve} + Q_{rde} = Q_{cd} + A_{rw} \cdot G_{rwa} \quad (26)$$

$$Q_{cd} = Q_{rw} \quad (27)$$

$$G_{rwa} = \alpha \cdot G_{rwinc} \quad (28)$$

$$Q_{cve} = h_e \cdot A_{rw} \cdot (T_{rwe} - T_{ext}) \quad (29)$$

$$Q_{rde} = \varepsilon_{rw} \cdot \sigma \cdot A_{rw} \cdot (T_{rwe}^4 - T_{sky}^4) \quad (30)$$

$$Q_{cd} = \frac{k_{rw} \cdot A_{rw}}{e_{rw}} \cdot (T_{rwe} - T_{rw}) \quad (31)$$

Para calcular la temperatura de las ventanas laterales se utilizan las ecuaciones 32 a la 37:

$$Q_{cve} + Q_{rde} = Q_{cd} + A_{lsw} \cdot G_{lswa} \quad (32)$$

$$Q_{cd} = Q_{lsw} \quad (33)$$

$$G_{lswa} = \alpha \cdot G_{lswinc} \quad (34)$$

$$Q_{cve} = h_e \cdot A_{lsw} \cdot (T_{lsw e} - T_{ext}) \quad (35)$$

$$Q_{rde} = \varepsilon_{lsw} \cdot \sigma \cdot A_{lsw} \cdot (T_{lsw e}^4 - T_{sky}^4) \quad (36)$$

$$Q_{cd} = \frac{k_{lsw} \cdot A_{lsw}}{e_{lsw}} \cdot (T_{lsw e} - T_{lsw}) \quad (37)$$

Se puede suponer que  $rsw$  es equivalente a  $lsw$  y por lo tanto no es necesario repetirlo.

La transferencia de calor desde el techo al aire interior se calcula a partir de un balance de calor para el elemento de techo:

$$Q_{cvroof} + Q_{rdroof} = Q_{cdceiling} + G_{roofa} \quad (38)$$

$$Q_{cdceiling} = Q_{ceiling} \quad (39)$$

$$G_{roofa} = \alpha_{roof} \cdot G_{roofinc} \quad (40)$$

$$Q_{cvroof} = h_{roof} \cdot A_{roof} \cdot (T_{roof} - T_{ext}) \quad (41)$$

$$Q_{rdroof} = \varepsilon_{roof} \cdot \sigma \cdot A_{roof} \cdot (T_{roof}^4 - T_{sky}^4) \quad (42)$$

$$Q_{cdceiling} = \frac{k_{ceiling} \cdot A_{ceiling}}{e_{ceiling}} \cdot (T_{roof} - T_{ceiling}) \quad (43)$$

$$Q_{ceiling} = h_{ceiling} \cdot A_{ceiling} \cdot (T_{ceiling} - T_{air}) \quad (44)$$

Donde  $Q_{cv,roof}$  es el flujo de calor convectivo que hay entre la superficie del techo y el aire ambiente;  $Q_{rd,roof}$  es el flujo de calor que existe por radiación entre el techo y el cielo y  $Q_{cd,roof}$  es el flujo de calor conductivo que se genera dentro de la superficie del techo;  $G_{roof,inc}$  es el incidente irradiación solar del techo de la cabina. La absorción que se genera en la superficie externa es  $\alpha_{roof}$ , y  $A_{roof}$  es el área de la superficie del techo.

## 2.8. Software de simulación

El software usado en este trabajo de titulación para realizar las simulaciones y pruebas del modelo térmico es Matlab. El modelo desarrollado en Matlab, consiste en una función que ejecuta a otras funciones en diferentes scripts. *Cabina\_calor\_run.m* es el código base que ejecuta la simulación del modelo térmico, en este script se describen los parámetros globales del modelo. La función principal es un programa void que produce dos salidas que son el tiempo de la simulación y la temperatura del aire que se obtienen dentro de la cabina y parte inferior del vehículo. Se inicia con la definición de la función, y de variables globales que son necesarias para las siguientes funciones que se van a trabajar (ver Figura 19-2); masa del aire, capacidad calorífica del aire, capacidad calorífica de la base, los coeficientes de transferencia de calor, conductividad térmica del vidrio y del techo, áreas, espesores, ángulos de inclinación, coeficientes de absorción, emisividad y transmisibilidad.



## Descripción de solucionadores de Matlab

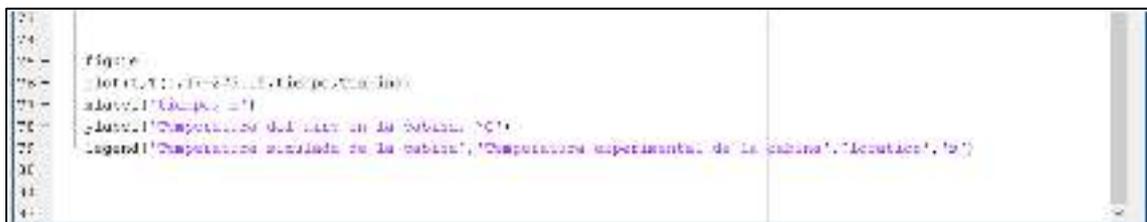
Todos los solucionadores de MATLAB ® ODE pueden resolver sistemas de ecuaciones diferenciales que se encuentren de la forma  $y'=f(t,y)$ , o problemas que involucren una matriz. Los solucionadores utilizan sintaxis similares; ode23s solo puede resolver problemas con una matriz constante. Las funciones ode15s y ode23t puede resolver problemas con una matriz más compleja, y su solución es conocida como ecuaciones algebraicas diferenciales (DAE) (Mathworks, 2021).

El solver que resuelve las ecuaciones diferenciales en nuestro caso es ode15S, debido a que devuelve una estructura que se puede utilizar para evaluar la solución en cualquier punto del intervalo de tiempo.

### Ode15s

Es uno de los solver de ecuaciones diferenciales rígidas y DAE que utiliza el método de orden variable, esta función ya se encuentra integrada en Matlab. La función ode15s tiene una velocidad de solución mucho más rápida para modelos donde se integran varias ecuaciones diferenciales.

Para finalizar el script que se muestra en la Figura 21-2, se graficó la solución en función del tiempo y de la temperatura en grados centígrados para comparar con los datos experimentales obtenidos.



```
71  
72  
73 - figure  
74 - hold on; plot(t, Tair, 'b'); plot(t, Tbase, 'r');  
75 - legend('Temperatura del aire en la cabina', 'Tair',  
76 - 'Temperatura del suelo en la cabina', 'Tbase', 'b');  
77 - legend('Temperatura ambiente de la cabina', 'Temperatura experimental de la cabina', 'Acotación', 'g');  
78  
79  
80  
81  
82
```

**Figura 21-4:** Código para ejecutar la gráfica del modelo

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El siguiente Script tiene por nombre *cabina\_calor.m* (ver Figura 22-2) y calcula la derivada en el punto actual donde se está trabajando. La cabina se puede representar en dos partes, la parte superior que contiene vidrios y el techo, y la parte inferior que representa la base, por lo que encontramos dos ecuaciones diferenciales indicadas en  $T_{air}$  y  $T_{base}$ . En el punto actual donde se está trabajando tenemos una temperatura ambiente, una temperatura del cielo, una radiación incidente y un calor generado por el calefactor.

En este punto determinamos cuánto vale la temperatura entre dos instantes de tiempo mediante una interpolación; esto aplica para la temperatura exterior, temperatura del cielo, irradiancia solar, calor generado.

```

1  function [d_cabina_calor(Tc, resreshA, resreshB, resreshC, pparreshA)]
2  %Esta función representa el modelo térmico de la cabina de un vehículo
3  %El modelo de intercambio de calor con los alrededores
4  %El modelo está basado en Marcos, Data, Echeverri & Cuevas "The development
5  %and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle" (2014).
6
7
8
9
10 %Inputs:
11 %Inputs: resreshA: Vector [K/m^2] About upper capte capote capote
12 %Inputs: resreshB: Vector [K/m^2] About lower capte capote capote
13
14 %Interpretación del vector de estados
15 StateT(1):
16 StateT(2):
17
18
19 %Parámetros
20 %Los parámetros de esta función, fueron definidos con los datos que vienen
21 %del modelo en el script que acompaña a este documento, en forma constante.
22
23 %Salidas
24 %Las salidas se manejan como entradas de las funciones
25 %resreshA: Vector [K/m^2] resreshA(1):Tc, resreshA(2):Tc, resreshA(3):Tc
26 %resreshB: Vector [K/m^2] resreshB(1):Tc, resreshB(2):Tc, resreshB(3):Tc
27
28 C1a=interp(Stavtabla(1:3), Stavtabla(1:2), Tc);
29 C1b=interp(Sgavtabla(1:3), gavtabla(1:2), Tc);
30

```

**Figura 22-5:** Script *cabina\_calor.m* entradas para las condiciones iniciales.

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Para determinar cuánto vale la derivada de la temperatura del aire dentro de la cabina se necesita saber el calor que atraviesa las ventanas, su cálculo se lo muestra en la Figura 23-2.

Además, una característica que tiene este modelo para poder calcular la derivada de la temperatura del aire es necesario conocer las temperaturas del vidrio y del techo, tanto del lado externo y de lado interno. No podemos suponer que el vidrio tiene una temperatura homogénea porque el calor no podría fluir a través de la superficie del techo y de los vidrios. Marcos et al. (2014) propone calcular temperatura del vidrio mediante balance de energía ya descritos con anterioridad en las ecuaciones (20) y (22).

En el script se agrega los cálculos previos de las temperaturas en las superficies, que se las desarrolla en la función *busquedaT.m* (véase Figura 25-2) y a su vez el cálculo de los coeficientes de convección para las diferentes superficies indicado en la función *convección.m* (véase Figura 26-2).

```

20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

```

Figura 23-6: Cálculo de temperaturas internas, externas y coeficiente de convección.

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

```

57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

```

Figura 24-7: Ecuaciones diferenciales del modelo térmico de la cabina.

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Para finalizar, el script *cabina\_calor.m* se realizó el cálculo de la incidencia solar transmitida hacia la base por la radiación y se inserta las ecuaciones (8) y (9) correspondientes al modelo térmico.

El procedimiento de iteración para el cálculo de la temperatura de las superficies opacas y acristaladas se detalla en la Figura 25-2.



```

Editor - B:\DeBunidos\Tesis\conveccion.m
conveccion.m
1 function h=conveccion(rsup,rinf,theta,modo,L,k)
2 %Se calcula el coeficiente de convección usando las correlaciones para el
3 %aire dependiendo del modo
4 %modo=1: vidrio vertical o parcialmente inclinado respecto a la vertical con
5 %un ángulo theta
6 %modo=2: placa plana, cara caliente hacia arriba, solo ocurre techo del lado de afuera.
7 %modo=3: placa plana, cara caliente hacia abajo, solo ocurre techo del lado de adentro.
8
9 %wsg=[1 100 5 10 15 20 25 30 35 40 45 200]+273.15;
10 %r=[0.7268 0.7350 0.7396 0.7328 0.7309 0.7296 0.7282 0.7268 0.7253 0.7241 0.6976];
11 %mu=[(1e-5)*(0.5837 1.382 1.426 1.47 1.516 1.562 1.608 1.655 1.702 1.750 3.455)];
12 %g=9.8*cos(theta);
13 %tp=abs((rsup/2+rinf/2));
14 %beta=1/tp;
15 %Pr=interp(rsup,PrT,tp);
16 %nu=interp(wsg,nuT,tp);
17 %Gr=g*beta*abs(rsup-rinf)*L^3/mu;
18 %Ra=Gr*Pr;
19
20 if modo == 1 %vertical
21     Nu = 0.825 + 1.087*(Ra^(1/4)) / (1 + (11.82/(Ra^(1/4)))^(4/5))^(1/4) * (1 + (0.492/Pr)^(4/5))^(1/4)^(1/4);
22 elseif modo == 2 %horizontal cara caliente hacia arriba
23     if Ra<10^7
24         Nu = 0.54*(Ra^(1/4));
25     else
26         Nu = 0.15*(Ra^(1/3));
27     end
28 elseif modo == 3 %horizontal cara caliente hacia abajo
29     Nu = 0.27*(Ra^(1/4));
30 end
31 h = Nu/L*k;

```

Figura 27-10: Script para el cálculo de la convección (*conveccion.m*)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Luego de encontrar el resultado de la temperatura de aire dentro de la cabina, valores necesarios para el cálculo de la demanda térmica, el script “*demandatermica\_run.m*” (véase Figura 28-2) ejecuta la simulación del calor sensible que debe suministrar el sistema de aire acondicionado para mantener la cabina en una zona de confort. En este script se describen las variables globales que son necesarias para la solución, flujo másico del aire, capacidad calorífica del aire, temperatura deseada para el confort, intervalo en el que los datos de temperatura del modelo fueron muestreados. Luego de ingresar estos parámetros se llama al archivo que contiene el resultado de la temperatura del aire en el interior de la cabina y se termina el script con la solución de la función que contiene la ecuación.

```

demandatermica_run.m
1 clear %borra todas las variables del workspace
2 clear %borra la pantalla
3 close all %borra todos los dibujos
4 %aire=0.1; %kg/s
5 %cpaire=1.005; %kJ/kgK
6 %Tcomfort=25; %Celsius
7 %deltaT=10; %Tiempo de ensayo
8 %archivo='3_sensible.xlsx'; %nombre del archivo de excel: debe estar entre corchetes, y ser suunto
9 %rang=10:140; %Para ensayo 1.
10 %rang=10:140; %Para ensayo 2.
11 %rang=10:140; %Para ensayo 3.
12 [Q,Comodoro,matriz,T]=demandatermica(archivo,rang,aire,cpaire,Tcomfort,deltaT);

```

Figura 28-11: Script para el cálculo de la demanda térmica.

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El script que contiene la función principal se denomina “*demandatermica.m*” (véase Figura 29-2), que es un programa void que produce dos salidas que son el tiempo que se obtiene de la simulación y la demanda térmica (calor sensible) que se obtienen dentro de la cabina. Se inicia con la definición de la función, se crea una matriz con los valores de temperatura del modelo y el intervalo de tiempo de muestreo, se plantea la ecuación para el calor sensible en función de las variables suministradas, y se finaliza con la gráfica del calor en función del tiempo.

```

demandatermica.m x +
1  function [Q,Qpromedio,matrix,T,tiempo]=demandatermica(archivo,rango,matrix,cpsaire,Tcomf
2      %importar los datos de excel
3  -  matrix=xlsread(archivo,rango);
4      %calcular el promedio de los datos importados
5  -  T=mean(matrix,2);
6      %obtener Q
7  -  Q=msaire*cpsaire*(T-Tcomf);
8      %graficar
9      %calcular el calor promedio
10 -  n=length(Q);
11 -  Qpromedio=(1/(n*deltat))*trapz(deltat*Q);
12
13 -  tiempo=0:deltat:(n-1)*deltat;
14
15 -  figure
16 -  plot(tiempo,Q);
17 -  ylabel('Calor removido en cada instante ,kW');
18 -  xlabel('tiempo');

```

**Figura 29-12:** Función principal para la demanda térmica.

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

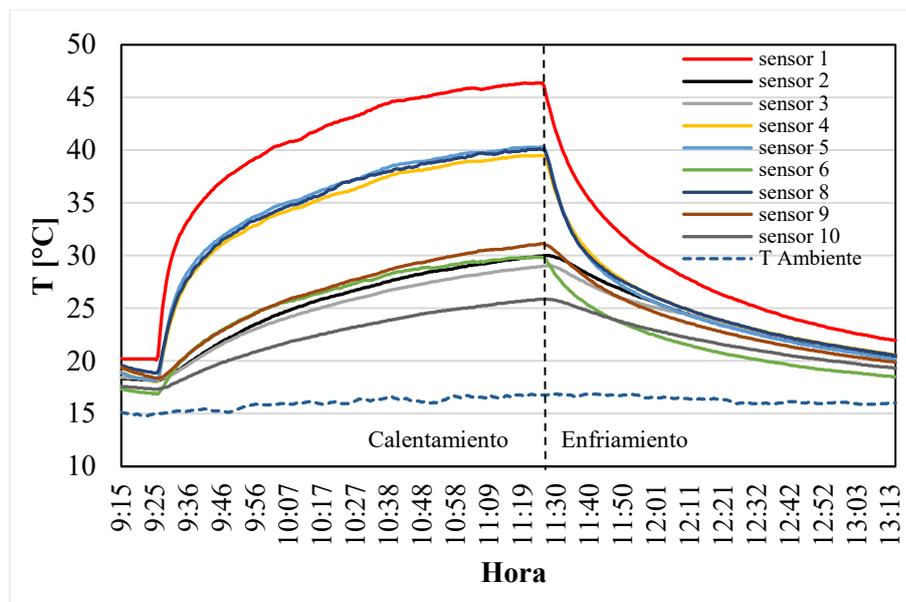
En este capítulo se comparan los datos experimentales con los resultados de la simulación del modelo térmico dinámico de la cabina del automóvil. Para validar el modelo térmico de la cabina, se cuantificó el error de los datos de simulación en relación con los datos experimentales medidos, utilizando el método del error porcentual absoluto y determinando valores del Error Medio Cuadrático (RMS). El coste computacional de las simulaciones es de 3 segundos correspondientes a un equipo computacional con características Procesador Intel(R) Core (TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz, 2808 MHz, 4 procesadores principales, 8 procesadores lógicos, Memoria física instalada (RAM) 16GB, NVIDIA GeForce GTX 1070 8GB.

#### 3.1. Análisis e interpretación de resultados de los experimentos

##### 3.1.1 *Ensayo experimental 1*

En el Gráfico 1-3, se observa el comportamiento de las temperaturas medidas por los 10 sensores en el interior de la cabina. Las curvas de calentamiento y enfriamiento presentan la misma tendencia en todos los sensores, difiriendo los valores en relación con la posición en la cual los sensores fueron ubicados. El sensor 1 muestra un mayor incremento en la temperatura del aire en la zona del tablero, esto se debe a que el calefactor se encuentra orientado hacia esa dirección como se indica en la Figura 16-2. La lectura de este sensor alcanza los 46,38 °C al finalizar la fase de calentamiento. En este punto todos los sensores llegan a su valor máximo de temperatura. Los sensores 4,5 y 6 presentan un comportamiento similar en sus valores de la temperatura del aire interior, los cuales fueron ubicados en el reposacabezas tanto para el conductor como para el pasajero y en el parabrisas posterior. La posición de estos sensores es importante debido a que es el área donde los ocupantes se pueden ubicar, alcanzando temperaturas de 39,50 °C, 40,31 °C y 29,87 °C respectivamente.

Los sensores 8 y 9 ubicados en la parte posterior al calefactor registran valores inferiores para la zona de los asientos traseros. Los sensores 2 y 3 ubicados en los asientos del conductor y acompañante respectivamente, siguen la misma tendencia de la curva de enfriamiento y calentamiento de aire dentro de la cabina. El sensor 7 representa la temperatura ambiente, y el sensor con menor registro de temperatura se debe al sensor 10 que se encuentra ubicado en el techo al interior de la cabina con un valor de 25,87 °C



**Gráfico 1-3:** Resultados del ensayo experimental 1 sin incidencia solar

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

En la Tabla 1-3 se muestra los valores máximos alcanzados en el ensayo experimental 1 por todos los sensores, incluyendo el valor máximo de temperatura ambiente y de temperatura promedio.

**Tabla 1-3:** Resultados temperatura máxima del ensayo experimental 1

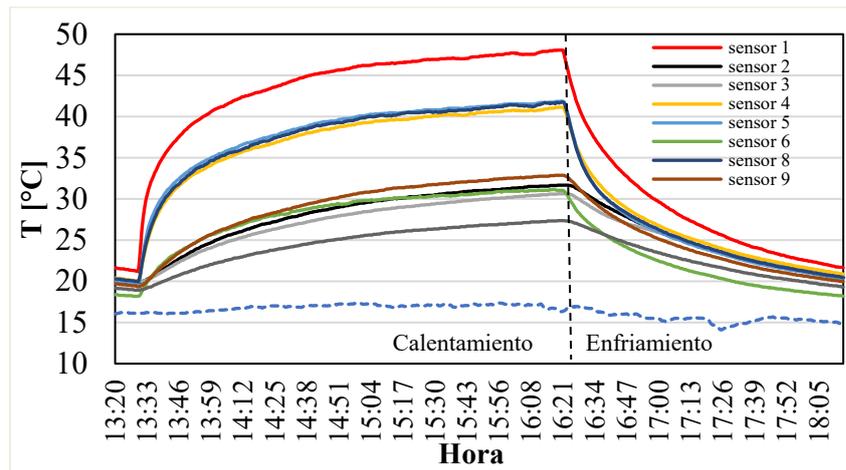
Sensor	Temperatura máxima [°C]
Sensor 1	46,38
Sensor 2	30,00
Sensor 3	29,06
Sensor 4	39,50
Sensor 5	40,31
Sensor 6	29,87
Sensor 8	40,13
Sensor 9	31,12
Sensor 10	25,87
T Promedio	34,67
T Ambiente	16,87

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 3.1.2 *Ensayo experimental 2*

En el Gráfico 2-3, se observa un comportamiento de temperaturas similar al ensayo experimental 1 en las curvas de calentamiento y enfriamiento medidas por los sensores, con la diferencia de un

mayor tiempo de exposición al calor generado por el calefactor, el objetivo de ampliar el tiempo del ensayo, fue observar cuanto varia la temperatura, prolongando el calor generado dentro de la cabina, se observó que el periodo en el cual la temperatura aumenta considerablemente, son los primeros 30 minutos, a partir de ese tiempo la temperatura aumenta exponencialmente. Se utilizan los mismos criterios mencionados anteriormente para describir la tendencia de la temperatura de los diferentes sensores. También se registra la temperatura ambiente.



**Gráfico 2-3:** Resultados del ensayo experimental 2

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

En la Tabla 2-3, se indica los valores de temperatura máxima registrados por los sensores para el ensayo experimental 2 así como también la temperatura promedio en el interior del habitáculo y el valor de temperatura ambiente.

**Tabla 2-3:** Resultados temperatura máxima del ensayo experimental 2

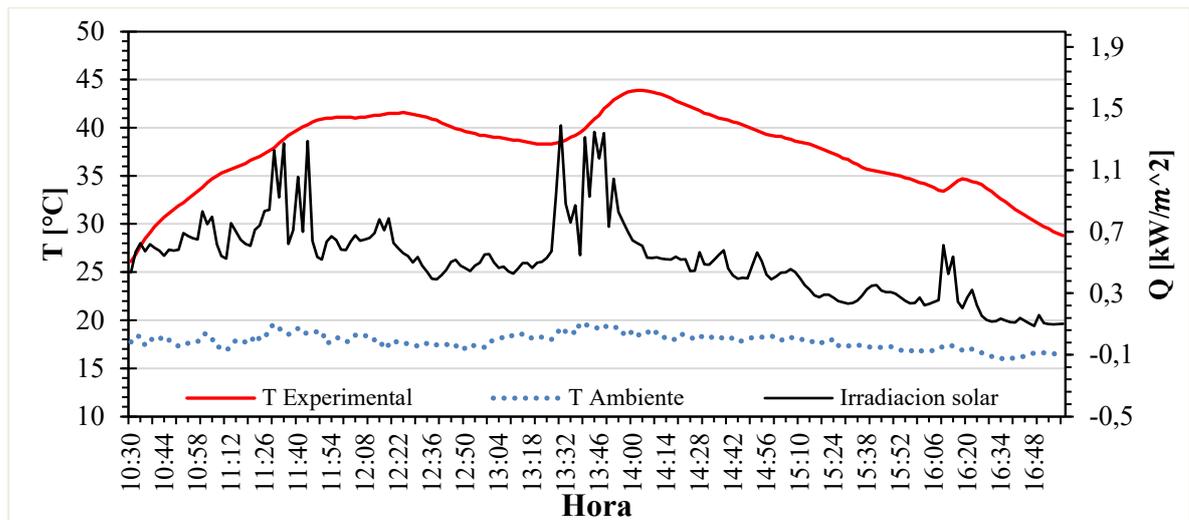
Sensor	Temperatura máxima [°C]
Sensor 1	48,06
Sensor 2	31,69
Sensor 3	30,62
Sensor 4	41,13
Sensor 5	41,88
Sensor 6	31,19
Sensor 8	41,75
Sensor 9	32,88
Sensor 10	27,37
T Promedio	36,27
T Ambiente	17,37

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 3.1.3 Ensayo experimental 3

Los resultados de temperatura medidos para el ensayo experimental 3 bajo incidencia de la irradiación solar a lo largo del día se observan en el Gráfico 3-3. Se utilizó un único dispositivo DataLogger DS102 para registrar los valores de la temperatura interior de la cabina. El registro de los datos se lo realizó cada dos minutos (120 segundos) y se observa la temperatura ambiente medida durante el ensayo y la radiación solar global en  $\text{kW}/\text{m}^2$ .

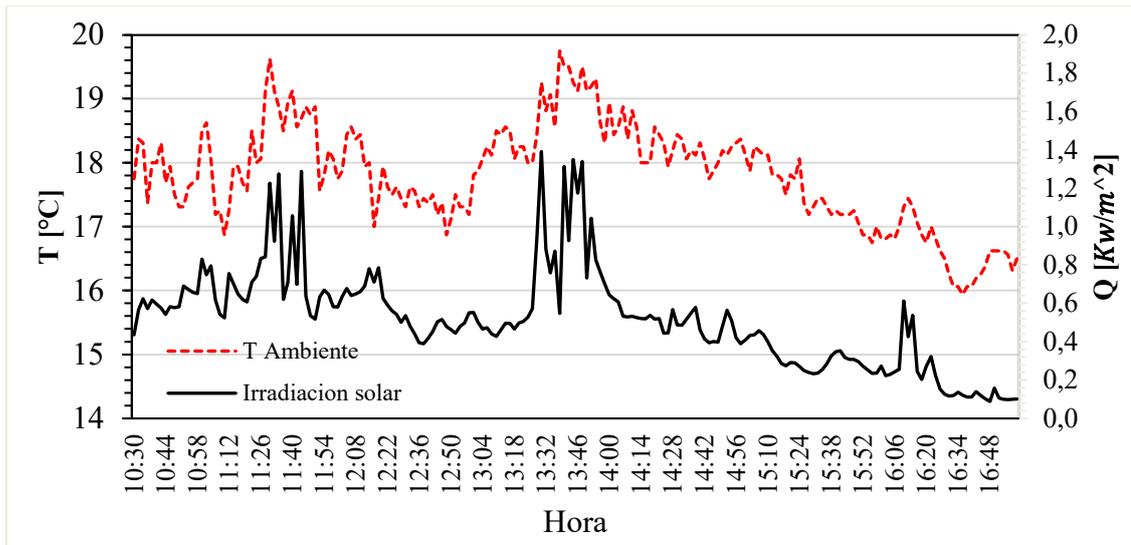
La temperatura máxima registrada es de  $43,9\text{ }^\circ\text{C}$  a las 14:02 h, como consecuencia de la radiación solar registrada minutos antes que alcanzara los  $1.3\text{ kW}/\text{m}^2$  a las 13:40h y se vuelve a registrar las 13:48 h. El desfase que existe entre los picos de radiación y la temperatura experimental de la cabina se debe al mismo proceso de transferencia de calor que debe seguir el objeto de estudio. El calor por radiación es absorbido por el vehículo y lo conduce a través de las superficies opacas y acristaladas, para transferirlo por convección con las masas interiores, debido a esto el calentamiento del aire interno es más tardío producto de una resistencia térmica, tal y como se muestra en el Gráfico 3-3.



**Gráfico 3-1:** Resultados del ensayo experimental 3

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

En el Gráfico 4-3 se observan los valores medidos de radiación solar global sobre superficie horizontal en  $\text{kW}/\text{m}^2$  por el Piranómetro MS206, durante el tiempo de experimentación. Se observa la influencia que tiene la irradiación solar en la temperatura ambiente, donde los picos generados en la medición de la radiación alcanzan valores de hasta  $1.4\text{ kW}/\text{m}^2$ , los mismos que se relacionan con el aumento máximo de temperatura ambiente que llega hasta un valor de  $19.5\text{ }^\circ\text{C}$  a las 13:40 h.



**Gráfico 4-3:** Temperatura ambiente e irradiación solar ensayo 3

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

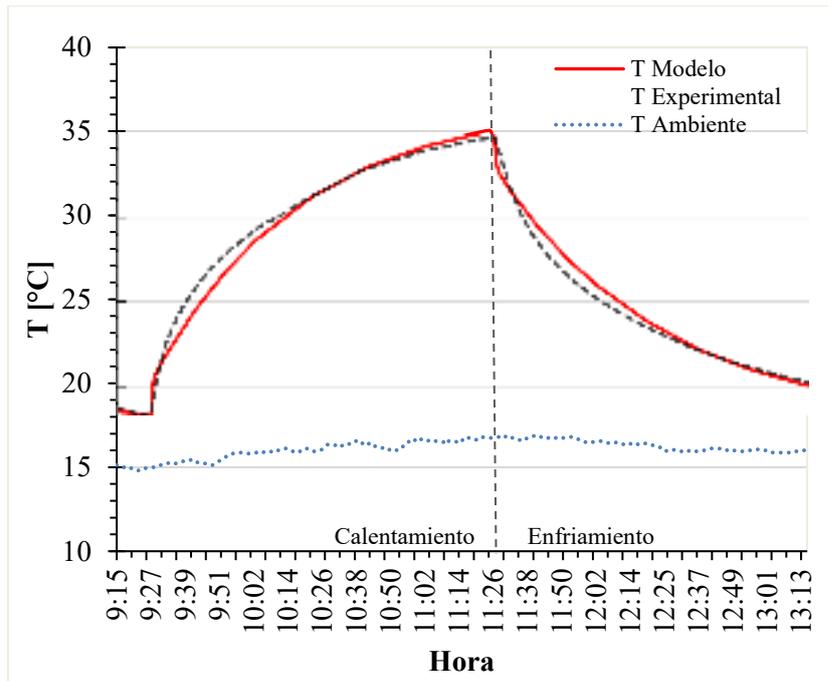
### 3.2. Validación del modelo térmico de la cabina del vehículo

Para validar el modelo térmico se utilizaron los siguientes parámetros de ajuste: el coeficiente de conductividad térmica del techo ( $k_{celling}$ ) y la capacidad calorífica que tiene la base ( $C_{base}$ ). Estos parámetros permiten ajustar el modelo en relación con los tres ensayos experimentales de acuerdo con la revisión bibliográfica. Adicionalmente, para la validación del modelo con incidencia solar se ajustó la emisividad ( $\epsilon$ ) que tienen las superficies opacas.

Debido a que las puertas, techo y base del vehículo se componen de distintos materiales y cada uno de los materiales cuenta con sus propiedades y características, el cálculo de la resistencia térmica por conducción se realizó aproximando los siguientes valores de ajuste del modelo térmico  $k=9$  W/mK y  $C_{base}=100$  kJ/K. Estos valores han sido aproximados a los valores en diferentes modelos como el de Marcos et al., (2014), que para un vehículo BMW SUV de mayores dimensiones utiliza valores de  $k=14.9$  W/mK y  $C_{base}=144.41$  kJ/K.

#### 3.2.1 Validación del modelo sin radiación solar

Los Gráficos 5-3 y 6-3, ilustran los resultados experimentales y los resultados de simulación de la temperatura del aire al interior de la cabina durante los ensayos 1 y 2 respectivamente. Es importante mencionar que la cabina del vehículo se consideró como zona única para criterios de estudio. En base a los datos obtenidos, la diferencia de temperatura máxima entre la curva experimental y la de simulación es de  $1.38$  °C para el ensayo 1 y de  $1.93$  °C para el ensayo 2.



**Gráfico 5-3:** Validación de la temperatura de aire interior (ensayo 1)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Al iniciar el ensayo experimental 1, la temperatura experimental de la cabina se encontraba a 18,75 °C a las 9:15 AM. Luego de transcurridos los primeros 10 minutos, la temperatura descendió a 18,24 °C. Con el calefactor encendido la temperatura en la cabina se incrementó hasta los 34,67 °C en la fase de calentamiento. Transcurridos 2 horas de funcionamiento (a las 11:25 AM) se apagó el generador de calor, dando lugar al inicio de la fase de enfriamiento. La temperatura interior del aire de la cabina descendió rápidamente en los primeros 7 minutos. Posteriormente, la rapidez de enfriamiento se vio afectada por el impacto de la inercia térmica de las masas interiores. La temperatura final del ensayo alcanzó los 20,21 °C al terminar la fase de enfriamiento a la 1:15 PM.

Las temperaturas experimentales fueron comparadas con los resultados del modelo, los cuales indican que la temperatura a las 9:15 AM fue de 18,75 °C, 10 minutos después un valor de 18,26 °C, en su punto máximo en la fase de calentamiento una temperatura de 35,06 °C y al término de la simulación 20,04°C. Para la validación el valor de RMS fue 0,57.

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (45)$$

Donde:

x: Datos medidos experimentalmente

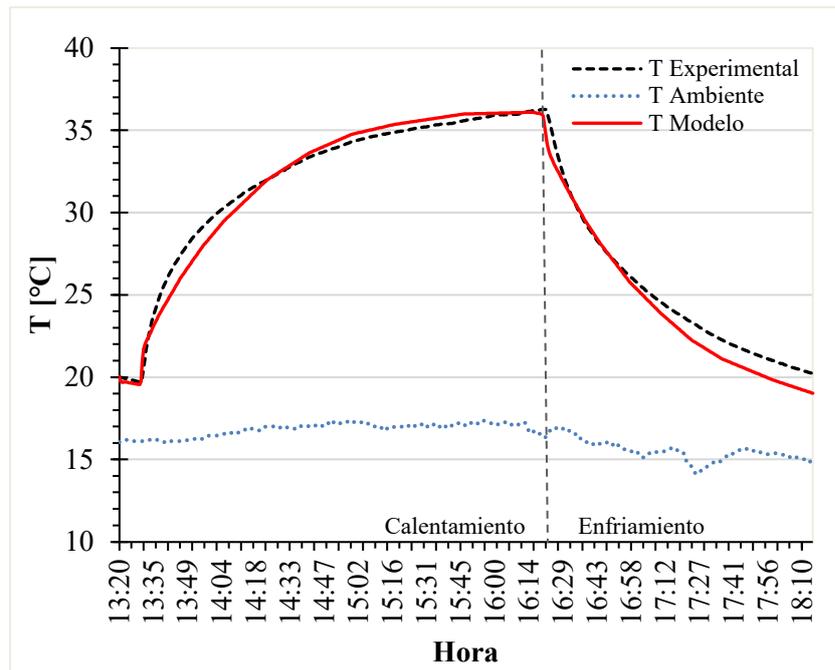
N: Cantidad de valores medidos

Los valores experimentales y de simulación obtenidos para el ensayo 1 se presentan en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-1:** Temperaturas (°C) ensayo experimental 1 vs modelo

	T inicial	T mínima	T máxima	T final
Experimental	18,75	18,24	34,67	20,21
Modelo	18,75	18,26	35,06	20,04

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021



**Gráfico 6-3:** Validación de la temperatura de aire interior (ensayo 2)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Así también, los valores experimentales de temperatura del aire dentro de la cabina para el ensayo 2 son muy similares al ensayo 1 como se observa en el Gráfico 6-3. Partiendo experimentalmente desde los 20,01 °C a las 13:20 h, en los primeros 10 minutos, punto de inicio de encendido del calefactor, se tuvo una temperatura de 19,69 °C, en donde las siguientes 3 horas de la fase de calentamiento, la temperatura aumentó progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 36,27 °C a las 16:20 h. Luego de apagar el calefactor, la temperatura del aire interior disminuyó rápidamente en los primeros 10 minutos, enfriándose de manera paulatina debido a la inercia térmica existente. El valor final para la simulación es de 20,21°C a las 18:15h.

Las temperaturas experimentales fueron comparadas con los resultados del modelo los cuales indican la temperatura a las 13:20 h un valor de 20,01 °C, luego de 10 minutos se muestra un

valor de 19,73 °C el cual en su punto máximo en la fase de calentamiento alcanzó una temperatura de 36,09 °C, y al término de la simulación, la temperatura fue de 19,02 °C.

El valor de RMS fue de 0.74. Como se observa en las gráficas, el modelo dinámico desarrollado, replica de manera similar el comportamiento de la temperatura del aire interior tanto en la fase de calentamiento como de enfriamiento en los procesos transitorios de la cabina con efecto de un generador de calor.

En la Tabla 4-3 se presentan los valores experimentales y los valores de simulación obtenidos para el ensayo 2.

**Tabla 4-3:** Temperaturas (°C) ensayo experimental 2 vs modelo

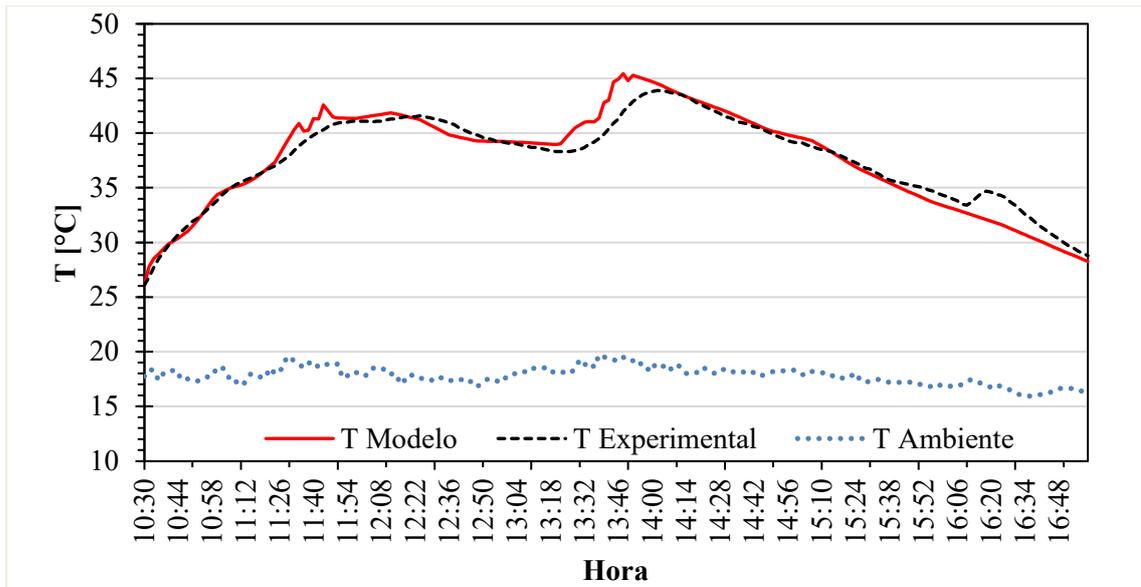
	T inicial	T mínima	T máxima	T final
Experimental	20,01	19,69	36,27	20,21
Modelo	20,01	19,73	36,09	19,02

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 3.2.2 Validación del modelo con radiación solar

Para la validación del modelo con radiación solar, se consideraron parámetros adicionales de ajuste del modelo. Se requirió ajustar la emisividad de la superficie, debido al color del vehículo y la influencia que genera con la radiación solar, este parámetro no fue necesario en la validación sin incidencia solar. El valor de acuerdo con el color del vehículo se estableció en  $\epsilon=0,7$ .

La validación del modelo térmico del vehículo bajo incidencia de la radiación solar se describe a continuación. Se calcularon los errores porcentuales y RMS en base a los resultados de la simulación y los datos experimentales. De acuerdo con los datos experimentales, la diferencia de temperatura máxima es de 3,78 °C, en donde los valores de temperatura más altos al interior de la cabina se presentan entre las 13:45h a 14:15h, esto se debe a que el cielo se presentaba despejado, permitiendo que la radiación solar que incide sobre el vehículo sea mayor, alcanzando una temperatura máxima de 43,9 °C. La temperatura al final del ensayo llega a los 28,8 °C, el ensayo termina a las 17:00h. El comportamiento térmico de la cabina tanto experimental como de simulación se presentan en el Gráfico 7-3.



**Gráfico 7-3:** Validación de la temperatura de aire interior (ensayo 3)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

La nubosidad presente en el ambiente provocó que la temperatura interna de la cabina sea menor al medio día, momento en el que se esperaba el mayor incremento en la temperatura debido a la mayor incidencia solar. Al comparar los valores alcanzados en la simulación, la temperatura máxima muestra un valor de 45,46 °C y una temperatura final de la simulación de 28,28 °C.

Se observa cómo el modelo térmico desarrollado reproduce efectivamente la temperatura experimental de la cabina bajo incidencia de la radiación solar, en distintas condiciones climáticas. El error máximo del modelo térmico para el ensayo 3 tiene un valor de RMS de 1.11, existiendo una diferencia de 3,78 °C entre la curva de simulación y experimental en su punto máximo.

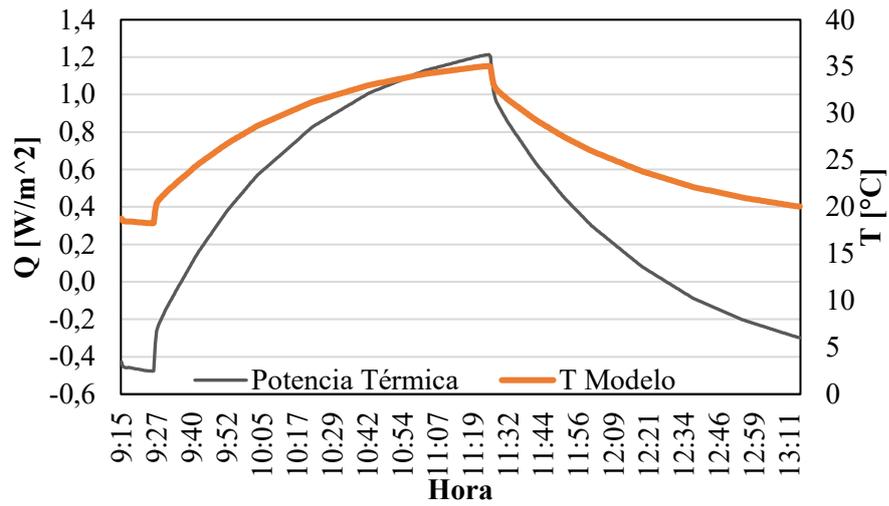
La Tabla 5-3 muestra todos los valores con los que se validó el modelo en base a sus resultados.

**Tabla 5-3:** Resultado y validación del modelo térmico

	RMS	Variación Max. [°C]	Q [kW]
Experimento 1	0,574	1,38	1,2
Experimento 2	0,740	1,94	1,3
Experimento 3	1,111	3,78	2,3

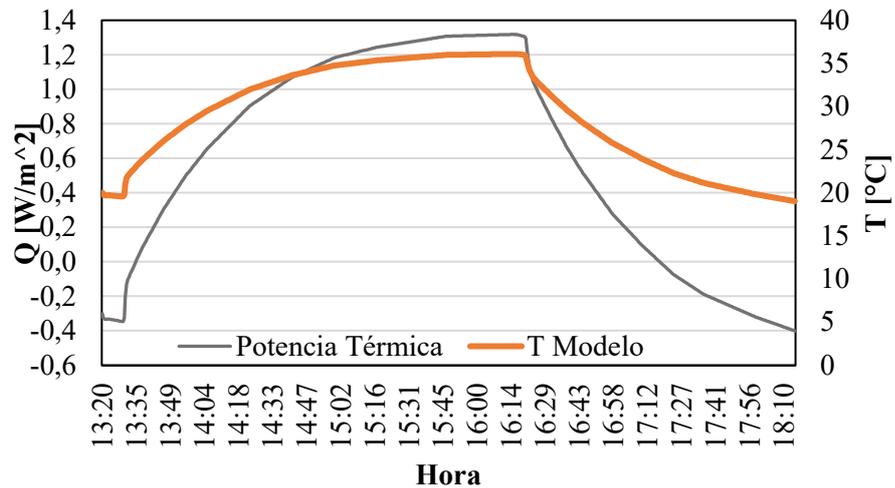
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

La energía calorífica o demanda térmica que se encuentra dentro de la cabina debe ser removida por el sistema de aire acondicionado, por esta razón es importante conocer el valor de esta energía. Para los ensayos experimentales 1, 2 y 3, la potencia térmica que se genera en la cabina se muestra en los Gráficos 8-3, 9-3, 10-3. Y sus valores máximos simulados se indican en la Tabla 5-3, estos valores de potencia son los necesarios para calcular dicha demanda térmica.



**Gráfico 8-3:** Resultado de la potencia térmica para la simulación 1

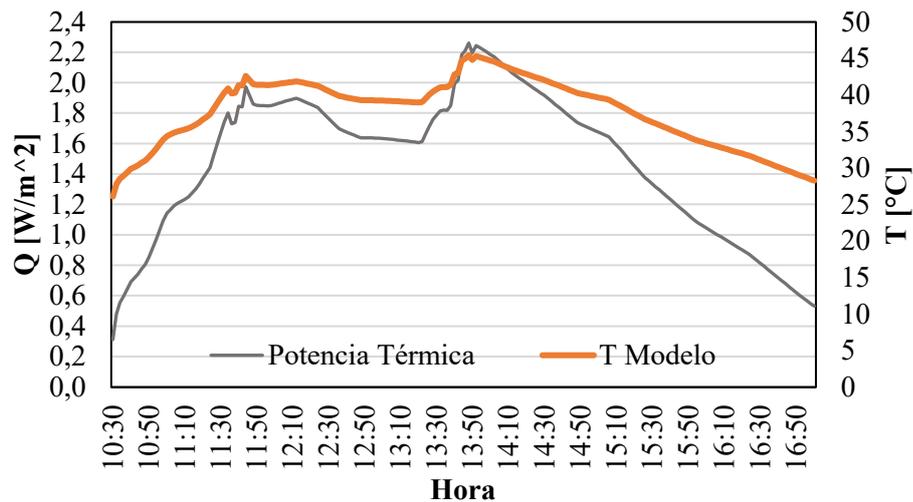
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021



**Gráfico 9-3:** Resultado de la potencia térmica para la simulación 2

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Los valores más altos alcanzados se producen en el ensayo 3, esto implica que la incidencia de la radiación solar es uno de los parámetros más importantes en las ganancias térmicas del vehículo.



**Gráfico 10-3:** Resultado de la potencia térmica para la simulación 3

**Realizado por:** Trujillo, J.; Machado, C. 2021

En base a la revisión bibliográfica, ASHRAE determina el valor para el confort térmico a una temperatura dada de 23 °C - 26 °C. Las simulaciones se realizaron en base a estos datos y se seleccionó el valor de confort para la cabina de 23 °C. Bajo las condiciones ambientales de cada ensayo experimental y las condiciones iniciales de cada uno, el valor de la potencia térmica es de 2262 Watts para el ensayo experimental 3, en el que se registra mayor carga térmica. El resultado para las simulaciones 1 y 2 son 1214 y 1318 Watts, respectivamente.

El cálculo del área bajo la curva de la potencia térmica representa la demanda térmica que se requiere sustraer dentro de la cabina y es la que el sistema de A/C debe de suplir, estos resultados se muestran en el Gráfico 27-3, realizada para los ensayos y las diferentes simulaciones.

### 3.3. Análisis del comportamiento térmico del vehículo

El comportamiento térmico del vehículo se analizó en base a simulaciones, utilizando el modelo térmico del vehículo que fue validado, utilizando los resultados de temperatura y radiación medidos en la ciudad de Riobamba, en un periodo de tiempo de 6 horas, en donde se modificaron ciertos parámetros para conocer su influencia sobre la temperatura interior y sobre la demanda térmica. En las simulaciones se varió el número de ocupantes, 1 ocupante para la simulación 4, 2 ocupantes para la simulación 5, y 5 ocupantes para la simulación 6. De igual manera, se varió el color del vehículo, utilizando las propiedades de la pintura tanto para color negro, amarillo y blanco, y finalmente, las propiedades de los vidrios (vidrio laminado y vidrio aislante).

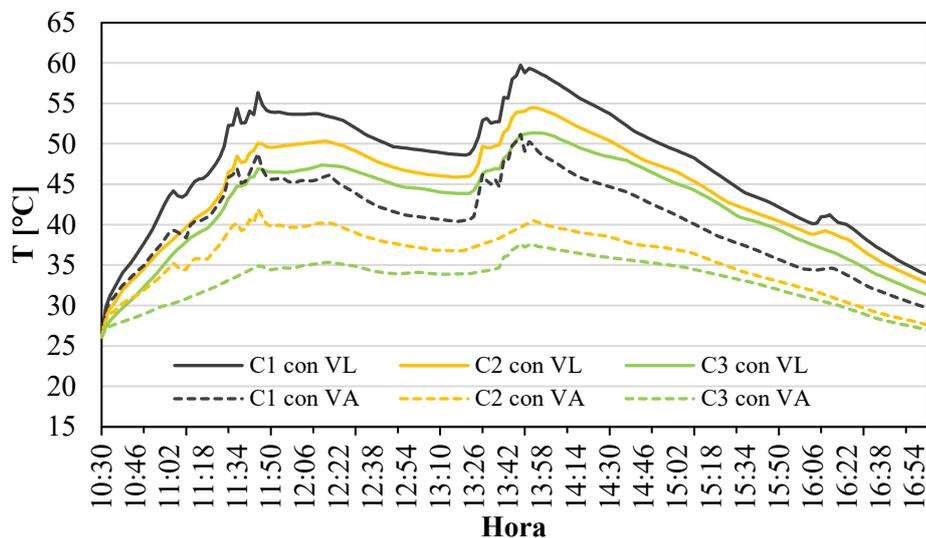
### 3.3.1 Influencia del tipo de cristales y color del vehículo en la temperatura interior con un ocupante (simulación 4)

Los resultados de la simulación se presentan en la Gráfica 11-3, donde se observa la tendencia que tiene la temperatura interior para las diferentes condiciones de simulación.

Los resultados con condiciones ambientales en la ciudad de Riobamba el día se detallan en la Tabla 6-3, tanto como para vidrio laminado (VL) y vidrio aislado (VA), en un periodo de tiempo de 6 horas, analizando el comportamiento de temperatura del aire dentro de la cabina.

Para el color del vehículo se usó, C1 color negro, C2 color amarillo y C3 color blanco.

La temperatura máxima alcanzada en las simulaciones muestra que el vehículo C1 que posee una absorptancia de 0.8, alcanza una temperatura de 59,77 °C cuando este se equipa con VL. La configuración que alcanza la temperatura más baja es el vehículo C3 equipado con VA con un valor de 37,65 °C; como se esperaba, esto se debe a las propiedades que posee el color blanco con una absorptividad baja que puede llegar a 0.2. Las propiedades del vidrio también influyen, para el mismo caso del vehículo C3 equipado con VL, la temperatura alcanza 51,35 °C, la diferencia de temperaturas es de 13,70 °C; para C1 y C2 la diferencia es de 8,6 y 12,58°C, respectivamente. De manera que, se demuestra que el vehículo de color blanco equipado con vidrio aislante con película de control solar alcanza una menor temperatura del aire interior.

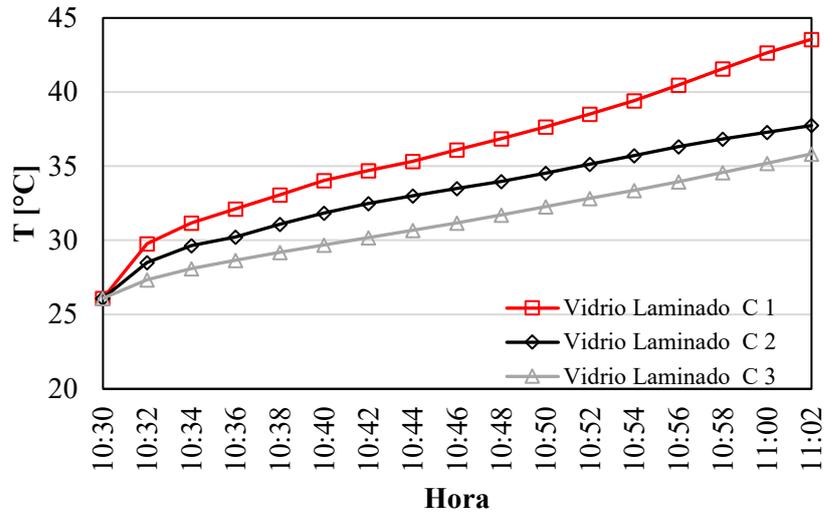


**Gráfico 11-3:** Comparación del comportamiento de la temperatura en simulación 4

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El comportamiento de la temperatura para las diferentes condiciones iniciales se muestra en el Gráfico 121-3, aquí se observa que existe similar tendencia en el calentamiento del aire. Las condiciones para el vehículo color negro C1 equipado con VL muestra un mayor aumento,

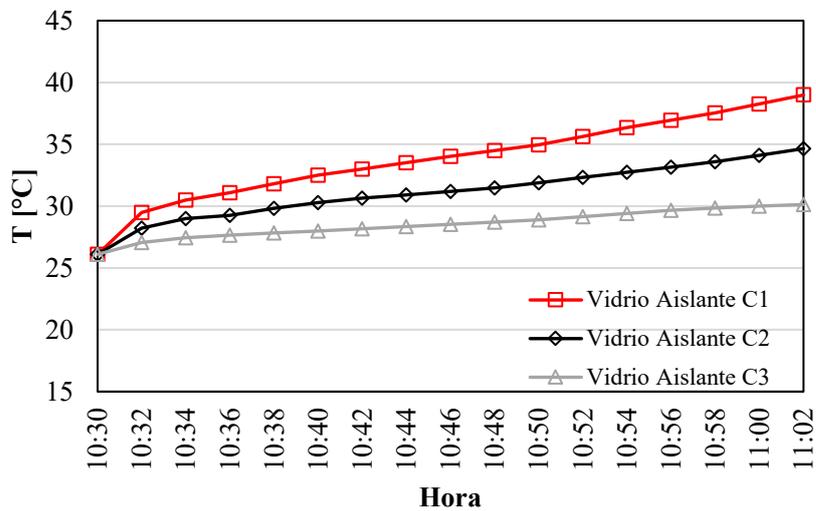
mientras que el vehículo C3 presenta el mismo comportamiento en el calentamiento, pero con valores menores, comparando con C1 y C2.



**Gráfico 12-3:** Comportamiento de la temperatura de vidrios laminados simulación 4

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Para vehículos equipados con vidrios aislantes el comportamiento de la temperatura sigue la misma tendencia al anterior, pero con una escala de temperatura menor (véase Gráfico 13-3). De igual manera, el vehículo C1 presenta el mayor incremento seguido del C2 y el que menor valores registra es el vehículo C3.



**Gráfico 13-2:** Comportamiento de la temperatura para vidrios aislantes simulación 4

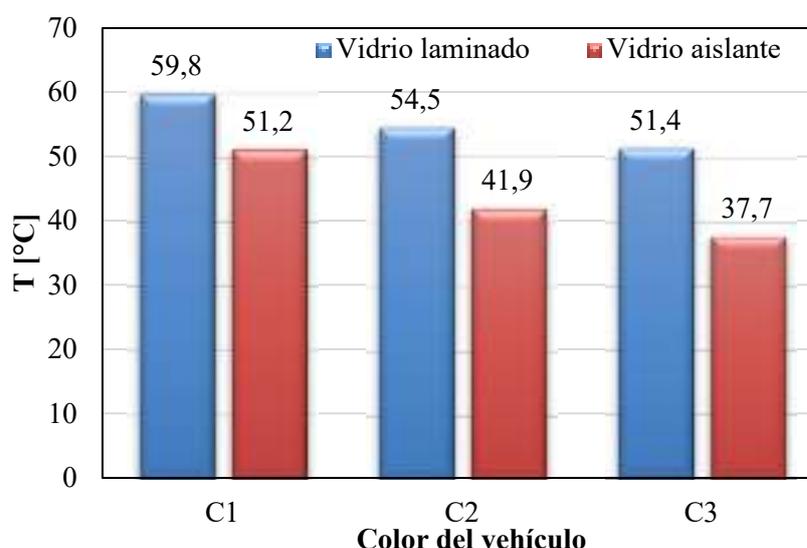
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

La variación que presentan los valores máximos de la simulación 4 para los colores C1, C2, y C3, equipados con vidrio laminado y vidrio aislante se indican en la Tabla 6-3 y se representan en el Gráfico 14-3.

**Tabla 6-3:** Resultados de la temperatura máxima en la simulación 4

	C1	C2	C3
Laminado	59,77 °C	54,52 °C	51,35 °C
Aislante	51,16 °C	41,93 °C	37,65 °C
Variación	8,60 °C	12,58 °C	13,70 °C

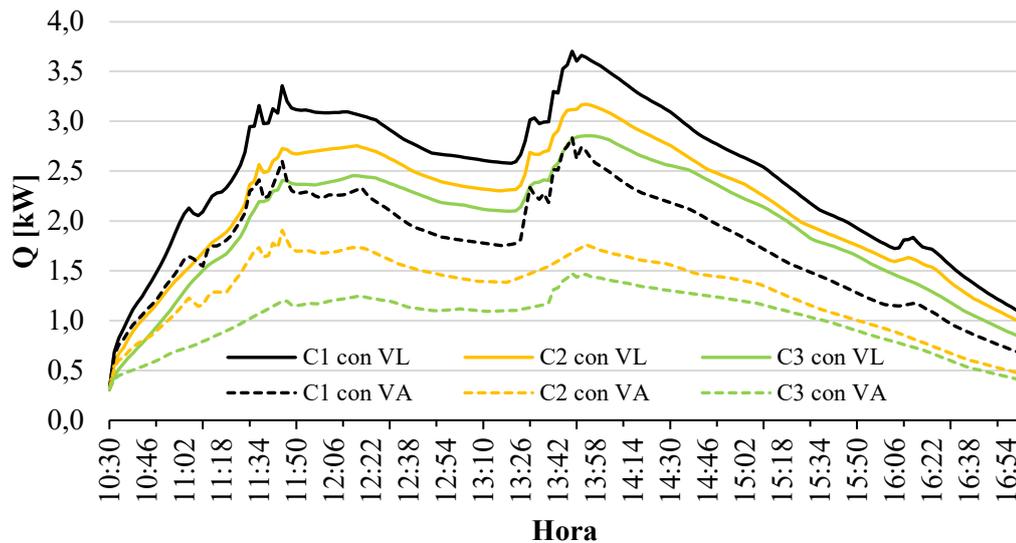
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021



**Gráfico 14-3:** Influencia de color del vehículo en la temperatura interior máxima (simulación 4)

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El resultado de la potencia térmica para las diferentes configuraciones, se comparan en el Gráfico 15-3, en la que se observa la variación existente entre un vehículo de color negro, amarillo, y blanco 3.70 kW, 3.17 kW, 2.86 kW, equipados con vidrios laminados. El vehículo que presenta mayor potencia térmica máxima es el vehículo de color negro, y el que menos potencia presenta es el vehículo color blanco, esto se debe principalmente al coeficiente de emisividad que tienen las pinturas con la radiación solar, comparando con los valores de 2.84 kW, 1.91 kW, 1.48 kW; obtenidos por los mismos vehículos equipados con vidrios aislantes nos da como resultado una reducción; 23.2 % para el vehículo negro, 39.9 % para el vehículo amarillo, y un 53.5 % para un vehículo con pintura blanca.



**Gráfico 15-3:** Comparación del comportamiento de la potencia térmica en la simulación 4

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 3.3.2 Influencia del tipo de cristales y color del vehículo en la temperatura interior con dos ocupantes (simulación 5).

Las condiciones para esta simulación se dan con temperatura exterior y radiación solar registradas en la ciudad de Riobamba, registrando una carga térmica para dos ocupantes dentro del vehículo en un periodo de tiempo estimado de 6 horas, las propiedades del vidrio son utilizadas para modificar la absorptividad ( $\alpha$ ), reflectividad ( $\rho$ ), transmisividad ( $\tau$ ), y de la misma manera, se realizaron simulaciones para diferentes tipos de color de la cabina, los colores seleccionados son negro, amarillo y blanco.

Al tratarse de similares condiciones a la simulación 4, la presencia de otro ocupante influye en la temperatura con un valor no significativo los resultados se presentan en la Tabla 7-3 y la tendencia del comportamiento en sus resultados se indica el Gráfico 162-3.

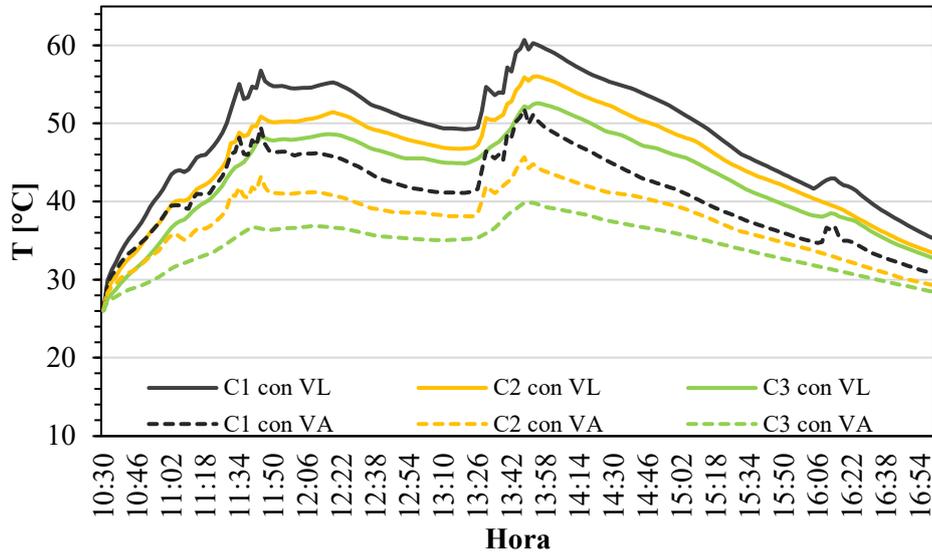
**Tabla 7-3:** Resultados de la temperatura máxima en la simulación 5

	C1	C2	C3
Laminado	60,71 °C	55,43 °C	52,59 °C
Aislante	51,82 °C	45,69 °C	39,87 °C
Variación	8,89 °C	10,37 °C	12,73 °C

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El aumento de un ocupante genera un leve incremento en las temperaturas máximas alcanzadas en la simulación; el valor de temperatura máxima es el esperado para el C1 equipado con VL con un resultado de 60,71 °C seguido del C2 y C3, con valores en su temperatura máxima de 55,43°C y 52,59°C, respectivamente. La mayor diferencia con la simulación 4 es el aumento de

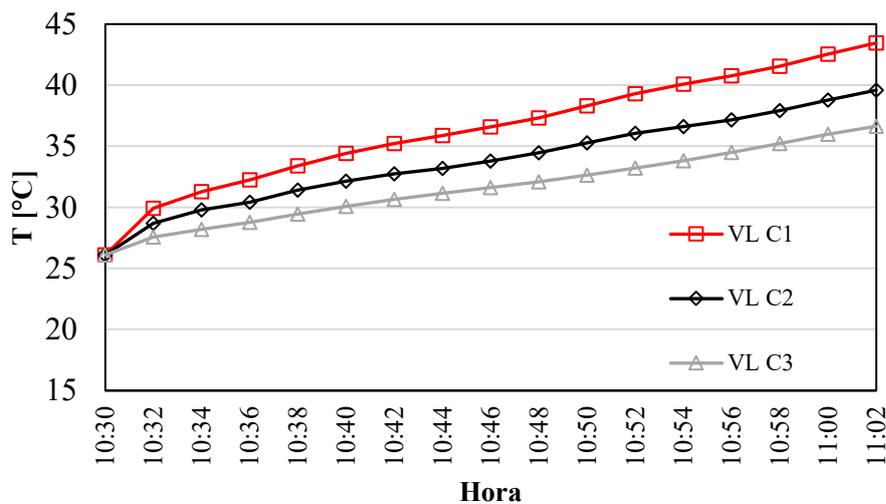
temperatura para las configuraciones de C2 y C3 equipados con VA, que presentan valores de 45,69 °C y 39,87 °C, respectivamente; estos valores representan una diferencia de temperaturas menor entre los resultados de C2 y C3 equipado con vidrio laminado y vidrio aislante que los encontrados en la simulación 4.



**Gráfico 16-3:** Comportamiento de la temperatura en simulación 5

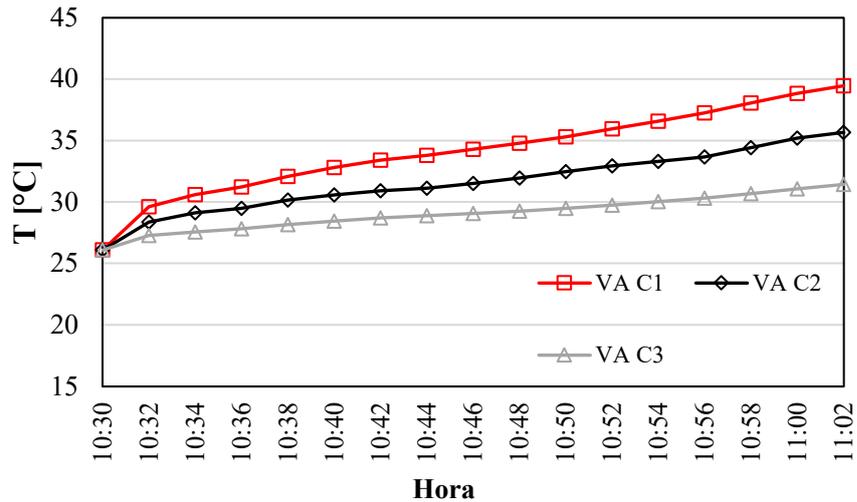
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El comportamiento de la temperatura sigue la misma tendencia que en la simulación 4, los valores representados son levemente mayores debido al ocupante extra pero no se muestra una significativa variación. En los Gráficos 17-3 y 18-3 se representa el comportamiento para las diferentes configuraciones de la simulación 5, tanto para los vehículos C1 C2 C3 equipados con VL y los equipados con VA respectivamente.



**Gráfico 17-3:** Comportamiento de la temperatura para vidrios laminados simulación 5.

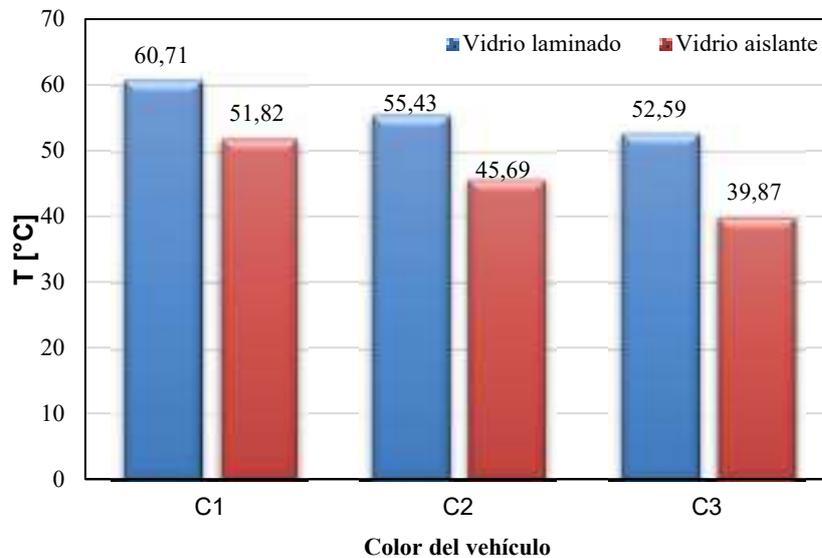
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021



**Gráfico 18-3:** C para vidrios aislados simulación 5

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

La comparación de los valores máximos alcanzados en la simulación 5, se muestran en el Gráfico 19-3, donde se muestra los resultados de temperatura para las configuraciones del vehículo en el caso C1 C2 y C3 equipados con VL y VA, respectivamente.

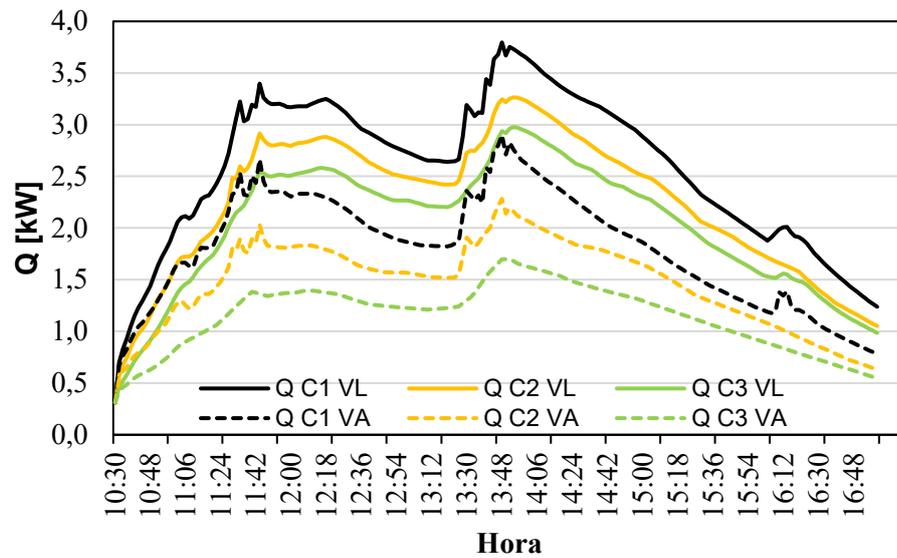


**Gráfico 19-3:** Comparación de la influencia de color del vehículo en la temperatura interior (simulación 5).

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El aumento de un ocupante en la cabina provoca un aumento en la potencia térmica como se muestra en el Gráfico 20-3, aquí se compara de igual manera que para el Gráfico 12-3, el resultado de la potencia térmica con dos ocupantes es; 3,80 kW, 3,27 kW, 2,98 kW, para los vehículos

negro, amarillo y blanco respectivamente con vidrio laminado, y para los mismos vehículos con vidrio aislante se genera una reducción del 23,6 %, 30,1 %, y 43,0%.

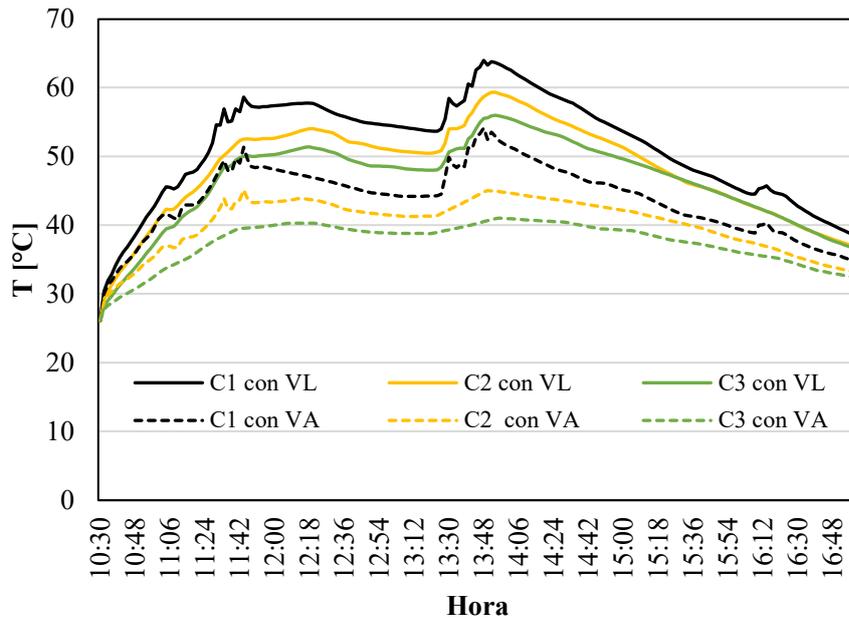


**Gráfico 20-3:** Comparación del comportamiento de la potencia térmica en simulación 4

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

### 3.3.3 *Influencia del tipo de cristales y color del vehículo en la temperatura interior con cinco ocupantes (simulación 6)*

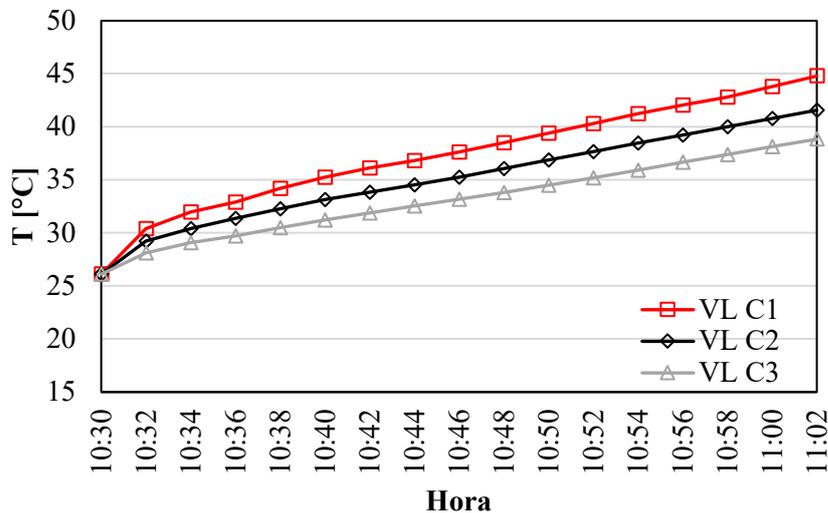
En la simulación 6 se consideran 5 ocupantes dentro de la cabina, el valor generado por esos ocupantes es de 320 Watts. Este aumento de ocupantes al interior de la cabina genera un aumento en la temperatura del aire que se representa en el Gráfico 21-3, donde para la configuración del vehículo C1 la máxima temperatura alcanzada es de 64,01 °C; los resultados para C1 y C3 equipados con VL son 59,35 °C y 55,99 °C, respectivamente. De la misma manera, se observa que las configuraciones con VA reducen su temperatura por las propiedades que presenta el parabrisas, los resultados se indican en la Tabla 8-3.



**Gráfico 21-3:** Comportamiento de la temperatura en simulación 6

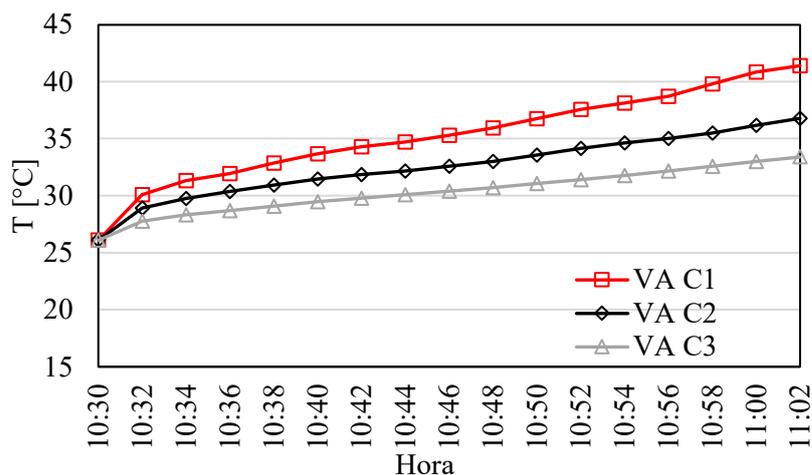
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

El aumento de ocupantes aumenta directamente el valor de temperatura interior del vehículo, esa es la mayor diferencia con el comportamiento de las simulaciones 4 y 5, la diferencia entre estos resultados son los valores máximos que se generan en cada simulación, en el Gráfico 22-3, se observa el comportamiento de temperatura para vidrio laminado y en el Gráfico 23-3 el comportamiento térmico para vidrio aislante.



**Gráfico 22-3:** Comportamiento de la temperatura de vidrios laminados simulación 6.

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021



**Gráfico 23-3:** Comportamiento de la temperatura de vidrios aislados simulación 6.

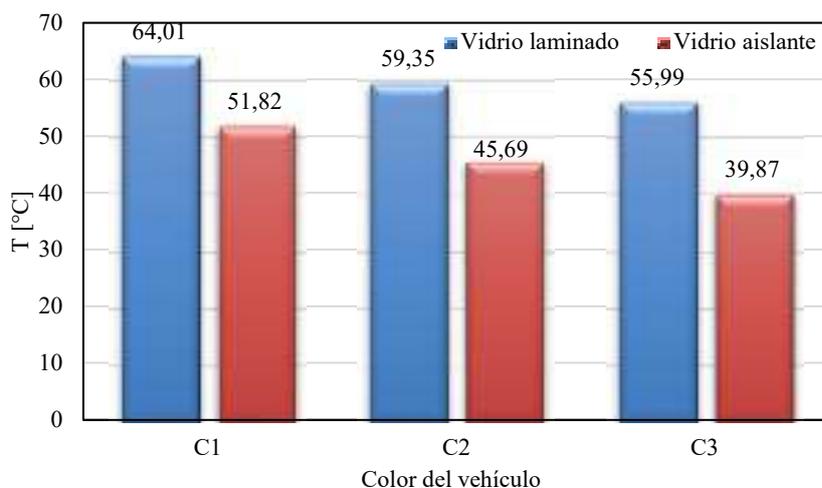
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

La diferencia de temperaturas entre VL y VA llega a valores de 14,42 °C en la configuración de color C3, valor que se esperaba por las propiedades del color tal como se observa en la Tabla 8-3. La comparación de estos resultados se representa en el Gráfico 24-3.

**Tabla 8-3:** Resultados de temperatura (°C) máxima en la simulación 6

	C1	C2	C3
Laminado	64,01	59,35	55,99
Aislante	51,82	45,14	41,03
Variación	9,11	10,11	14,42

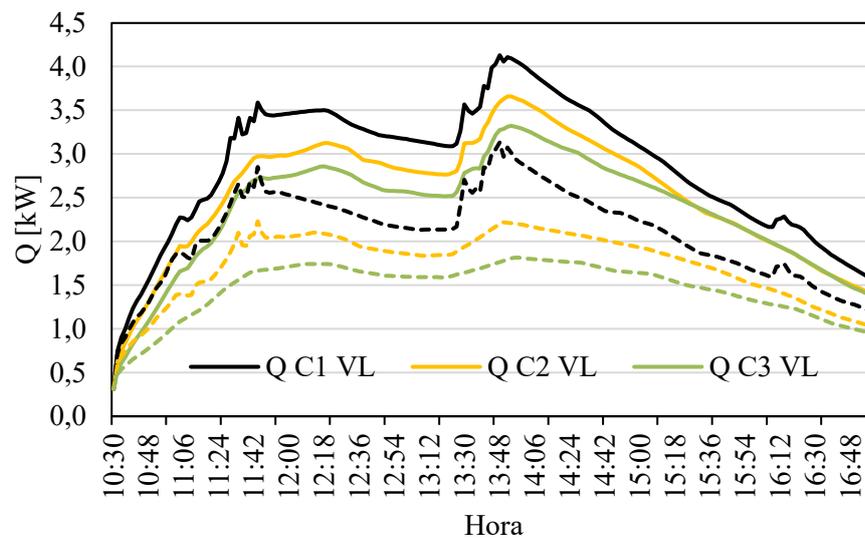
Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021



**Gráfico 24-3:** Comparación de la influencia de color del vehículo en la temperatura interior (simulación 6).

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Se puede observar que la potencia se incrementa conforme se aumenta el número de ocupantes, para la simulación 6 que corresponde a 5 ocupantes, los resultados de la potencia térmica se muestran en el Gráfico 25-3, de igual manera a las simulaciones anteriores los vehículos equipados con vidrio laminado son los que generan mayor potencia térmica, comparados con los mismo equipados con vidrios aislantes, así mismo el vehículo negro es el que alcanza mayor temperatura, seguido del amarillo y del blanco, los resultados de potencia para esta simulación fueron; 4,1 kW, 3,7 kW, 3,3 kW, comparados con 3,13 kW, 2,23 kW, 1,82 kW resultado de los vehículos equipados con vidrio aislante, indican una reducción del 24,2 %, 39,1 %, y 45,2%.



**Gráfico 25-3:** Comportamiento de la potencia térmica en simulación 6

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

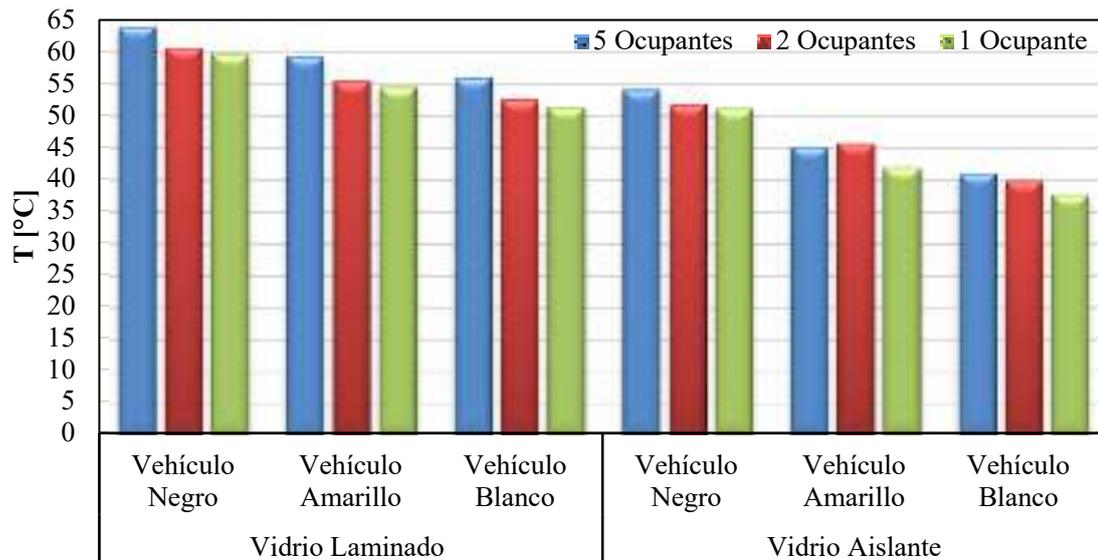
### 3.4. Comparación de resultados de las simulaciones

Los resultados obtenidos de la temperatura interior en las simulaciones 4, 5 y 6, se indican en la Tabla 9-3, y en el Gráfico 26-3.

**Tabla 9-3:** Temperaturas (°C) del aire interior para diferentes condiciones de simulación

Tipo de vidrio	Vidrio Laminado			Vidrio Aislante		
	Vehículo Negro	Vehículo Amarillo	Vehículo Blanco	Vehículo Negro	Vehículo Amarillo	Vehículo Blanco
1 ocupante	59,77	54,52	51,35	51,16	41,93	37,65
2 ocupantes	60,71	55,43	52,59	51,82	45,69	39,87
5 ocupantes	64,01	59,35	55,99	54,12	45,14	41,03

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021



**Gráfico 26-3:** Comparación de la temperatura interior en las diferentes condiciones de simulación

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

Los resultados son comparados con diferentes estudios similares. Dadour et al. (2011) muestra que para un vehículo con pintura negra la temperatura de la cabina presenta 5 °C más elevada que uno con pintura blanca. Akyol y Kilic (2010) también indican los resultados obtenidos para un vehículo con pintura blanca y son aproximadamente 7 °C más bajos comparándolos con uno de pintura negra. Comparando con los resultados obtenidos en la simulación 4, 5 y 6, el resultado de esta diferencia es de 8,42 °C, 8,12 °C y 8,02 °C, respectivamente. Esto se debe al número de ocupantes que se encuentran en el vehículo, lo que demuestra que el modelo térmico desarrollado en este trabajo de investigación tiene un rango de valores aceptables para la simulación bajo diferentes condiciones.

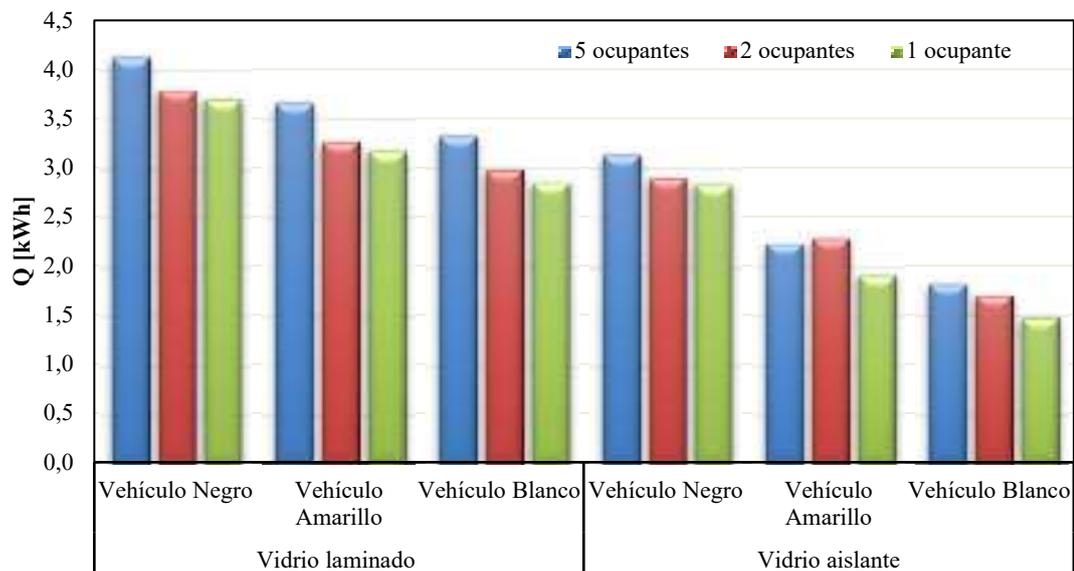
De la misma manera, autores como Tseng, Yan y Leong (2014) detallan los efectos de los dispositivos de protección contra la radiación solar en la variación de la temperatura de la cabina. Al comparar la instalación de las láminas con protector solar para ventanas, se demuestra que puede existir un cambio significativo en la temperatura de la cabina. Estos valores rondan de 8 °C a 14 °C. En el presente trabajo de investigación, además de la variación de las propiedades de los vidrios, se compararon los efectos de la aplicación de películas de control solar en vehículos de con diferentes pinturas; los resultados de la simulación 4 para vehículo con pintura negra, amarilla, y blanca son 8,89 °C, 10,37 °C, y 12,73 °C, respectivamente. Estos valores demuestran el correcto comportamiento que realiza las simulaciones del modelo térmico desarrollado en este trabajo.

En la Tabla 10-3 se muestran los valores de demanda térmica máxima obtenidos de las distintas simulaciones. Estos valores son comparados en el Gráfico 27-3 en donde se observa el comportamiento de la demanda y la dependencia con las características estructurales que tiene la cabina de un vehículo. Se observa una variación de la demanda térmica debido a las propiedades del color y la influencia del número de ocupantes en cada una de las condiciones; además, se compara el efecto que tiene el vidrio laminado frente al vidrio aislante, con similares condiciones de simulación.

**Tabla 10-3:** Demanda térmica (kWh) de la cabina para diferentes condiciones de simulación

Tipo de vidrio	Vidrio laminado			Vidrio aislante		
Color del vehículo	Vehículo Negro	Vehículo Amarillo	Vehículo Blanco	Vehículo Negro	Vehículo Amarillo	Vehículo Blanco
5 ocupantes	4,1	3,7	3,3	3,1	2,2	1,8
2 ocupantes	3,8	3,3	3,0	2,9	2,3	1,7
1 ocupante	3,7	3,2	2,9	2,8	1,9	1,5

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021



**Gráfico 27-3:** Comparación de la demanda térmica interna en las diferentes condiciones de simulación.

Realizado por: Trujillo, J.; Machado, C. 2021

La implementación de una herramienta que determine la temperatura y la demanda térmica que se genera en un vehículo, puede ser de gran utilidad en la fabricación y selección de componentes para los sistemas de climatización, optando por reducir o aumentar las dimensiones de los

componentes para satisfacer la sensación de confort térmico que se desea en el vehículo, bajo distintas condiciones ambientales a las cuales puede estar operando. De la misma manera, estos datos pueden ser necesarios en futuras investigaciones para el cálculo de la eficiencia, consumo y optimizaciones en los sistemas de climatización, especialmente cuando se realicen estudios transitorios como en la evaluación de un trayecto o ruta.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de titulación se desarrolló un modelo térmico de la cabina de un vehículo para predecir el comportamiento térmico bajo varias condiciones ambientales exteriores. Se demostró que la aplicación del método de balance de calor permite simular de manera rápida y correcta la temperatura interior de la cabina del vehículo y las cargas de calor bajo condiciones de operación reales. Para ello, se replicó el comportamiento térmico de la cabina de un automóvil Chevrolet Steem 4L en condiciones transitorias. Dado que se toman en cuenta los principales métodos de transferencia de calor para el desarrollo del modelo, éste reproduce de manera muy similar el comportamiento de las temperaturas en la cabina con y sin la incidencia de radiación solar variable.

El modelo fue implementado en el software Matlab, permitiendo modificar parámetros como son: las condiciones ambientales, los coeficientes de convección, tipos de superficies opacas y acristaladas, propiedades del material y valores de geometría de la cabina si se consideraran otro tipo de vehículos.

Para la validación del modelo se realizaron medidas experimentales de temperatura interior, exterior y radiación solar con el vehículo estacionado en el exterior e interior de un garaje, con y sin incidencia de la radiación solar en el calentamiento y enfriamiento de la cabina. Los resultados muestran el comportamiento térmico de la cabina y la dependencia con las diferentes condiciones ambientales exteriores.

El modelo fue ajustado variando los parámetros de conductividad térmica del techo, la capacidad calorífica de la base y para la validación con incidencia solar se ajustó el coeficiente de emisividad característico de acuerdo con cada color del vehículo. A pesar de que la geometría de la cabina fue simplificada y considerada como única zona de aire, la predicción de los valores de temperatura de la cabina mostradas por el modelo tiene concordancia con los datos medidos experimentalmente. Finalmente, se realizaron simulaciones con el modelo validado, en las cuales se variaron parámetros como: condiciones ambientales, cargas térmicas, tipos de superficies opacas y acristaladas, color de superficie.

Los resultados de las medidas experimentales de temperatura máxima para los ensayos sin incidencia solar (instalado un calefactor como fuente de energía fueron) 34,67 °C, y 36,27 °C para los ensayos 2 y 3, respectivamente. Para el caso con incidencia solar, la temperatura máxima alcanzada dentro de la cabina fue de 45,46 °C.

La validación del modelo se llevó a cabo con la comparación de los resultados mostrados por las simulaciones del modelo y los resultados de las medidas experimentales realizadas, la variación

máxima de las simulaciones con los resultados muestra temperaturas de 1,38 °C, 1,94 °C y 3,78 °C, para los ensayos experimentales 1, 2 y 3, respectivamente.

Se realizaron simulaciones cambiando varios parámetros como: condiciones ambientales, cargas térmicas, tipos de superficies opacas y acristaladas. Los resultados concuerdan con los encontrados en la revisión de la literatura. La temperatura interior que presenta un vehículo con vidrio laminado normal y con vidrio con película de control solar, muestra variaciones de 8 a 14 °C en tres configuraciones diferentes para distintos tipos de pintura del vehículo. Igualmente, la diferencia que existe entre la temperatura interior de acuerdo con el color de pintura disminuye al comparar un vehículo de pintura negra con uno amarillo, y disminuye más con el color blanco, debido a los diferentes valores de absorción que tienen los colores. Los resultados de estas simulaciones muestran temperaturas máximas de 59,77 °C 54,52 °C y 51,35 °C, para un vidrio laminado normal, y 51,16 °C, 41,93 °C y 37,65°C, para un vidrio con lamina de control solar para las tres diferentes pinturas negro, amarillo, y blanco, respectivamente.

De acuerdo a los resultados se comprobó que el color, el número de ocupantes y el tipo de vidrio afectan directamente a la demanda térmica que posee el interior de la cabina de nuestro vehículo, la propiedad que influye de acuerdo al color es la absorción que tiene este a la radiación solar, así el vehículo de color negro genera una demanda térmica de 4.1 kWh para el vehículo con 5 ocupantes, 3.8 kWh para el vehículo con 2 ocupantes y 3.7 kWh con 1 ocupante, estos valores fueron el resultado para el vehículo equipado con vidrio laminado, comparando con los resultados del vidrio aislante se obtuvieron resultados de 3.1 kWh para 5 ocupantes, 2.9 y 2.8 kWh para 2 y 1 ocupantes, En comparación con el vehículo de color blanco que resulto con 3.3 kWh, 3.0 kWh y 2.9 kWh, esto demuestra la influencia de los diferentes parámetros en la demanda térmica de la cabina.

El modelo puede ser utilizado como una herramienta de apoyo en el estudio de diseño y optimización de sistemas HVAC para economizar en el consumo de combustible y en la programación de módulos en tiempo real de sistemas de control de la cabina del automóvil. Predecir el comportamiento térmico de la cabina es importante para determinar la demanda de calor que el sistema de climatización de un vehículo debe satisfacer para mantener la cabina en condiciones de confort térmico en función de las condiciones ambientales.

## RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se recomienda realizar medidas experimentales más amplias para validar las simulaciones del modelo a lo largo de uno o más días, con el fin de demostrar la fiabilidad del modelo desarrollado en estudios más minuciosos.

Puesto que la temperatura de la cabina es susceptible de variación ante cambios de agentes externos, es recomendable utilizar equipos que dispongan de un amplio rango de medición con una tolerancia acorde a los objetivos o tipo de estudio planteados ya que los datos registrados pueden mostrarse de manera errónea.

Mantener las condiciones ideales para la toma de medidas en los ensayos experimentales es casi imposible, por lo que se recomienda contar con un escenario donde exista el mínimo de perturbaciones, ya sea infiltraciones de corrientes de aire o radiación solar como es el caso de registro de datos para los ensayos 1 y 2, y contar con un escenario al aire libre que sea despejado y donde no exista edificaciones ni sombras, lo cual permitirá que la incidencia solar incida sobre el objeto de estudio en su totalidad, para así contar con valores de temperatura y radiación acordes a su dependencia.

En investigaciones venideras se aconseja recopilar toda la información existente del fabricante del vehículo, a fin de tener información exacta sobre las propiedades del material de construcción, tipo de superficies acristaladas y también sobre la geometría del vehículo, lo cual ahorraría mucho tiempo en el desarrollo del trabajo de investigación, dado que este apartado involucró tiempo importante en la realización de este trabajo.

Es recomendable tomar en cuenta la mayoría de los factores físicos internos y externos que influyen en el comportamiento térmico de la cabina, a fin de que el resultado del modelo presente una mayor exactitud en comparación con los datos experimentales, pudiéndose tener más parámetros de ajuste que permitan validar aún más el trabajo de investigación.

Finalmente, se debería realizar un estudio próximo bajo los mismos parámetros de investigación realizados en este trabajo, implementando un nuevo diseño de sistema HVAC, para así poder comparar el comportamiento térmico de la cabina y establecer nuevos criterios de investigación en relación con el confort térmico de los pasajeros.

Comprender el entorno térmico del automóvil es el punto de inicio para alcanzar un nivel de confort térmico para los pasajeros del vehículo. Si el modelo es utilizado para predecir el confort térmico de los pasajeros, es necesario realizar mejoras en cuanto a la geometría interna (asientos, tablero, etc.), en la descripción de la convección al interior de la cabina.

## **GLOSARIO**

**Balance de energía:** Estudio de los cambios energéticos que interactúan dentro de un sistema.

**Calor:** Forma de energía que se manifiesta por un aumento de temperatura provocado por movimiento vibratorios de los átomos y moléculas que constituyen los cuerpos.

**Capacidad frigorífica:** Cantidad de calor que es capaz de absorber un sistema de refrigeración por hora de funcionamiento para reducir la temperatura.

**Carga térmica:** Cantidad de calor con respecto al tiempo que debe ser retirada para mantener determinadas condiciones de temperatura y humedad.

**Demanda térmica:** Energía real que necesita un sistema para mantener una temperatura establecida en el interior de una zona.

**Irradiancia:** Cantidad de energía que incide por unidad de área en un determinado tiempo sobre una superficie específica.

**Modelo:** Representación teórica de un fenómeno o proceso real que ofrece cierto grado de precisión en la manera más completa posible utilizando herramientas de cálculo.

**Simulación:** Herramienta que permite evaluar y analizar procesos reales para así validarlos y obtener una mejor configuración.

## BIBLIOGRAFÍA

**AKYOL, S.; & KILIC, M.**, “Dynamic simulation of HVAC system thermal loads in an automobile compartment”. *International Journal of Vehicle Design (IJVD)*. 2010. (Turquía) 52(1), pp. 177–198.

**AL-KAYIEM, H.; et al.** “Study on the Thermal Accumulation and Distribution Inside a Parked Car Cabin”. *American Journal of Applied Sciences* [en línea], 2010. (Malaysia) 7(6), pp. 784–789. [Consulta: 20 febrero 2021]. ISSN 1546-9239. Disponible en: <https://thescipub.com/pdf/ajassp.2010.784.789.pdf>

**ASHRAE**, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”. *International Journal of Refrigeration*, 2010. 2(1), pp. 56–57. [Consulta: 09 diciembre 2020]. ISSN 01407007. Disponible en: <http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2015/11/ASHRAE-55-2010.pdf>

**ASHRAE STANDARD**. “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2004, 55 pp. 1–34. [Consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: [http://www.ditar.cl/archivos/Normas\\_ASHRAE/T0080ASHRAE-55-2004-ThermalEnviromCondiHO.pdf](http://www.ditar.cl/archivos/Normas_ASHRAE/T0080ASHRAE-55-2004-ThermalEnviromCondiHO.pdf)

**AYALA, Carlos & MONTENEGRO, Edgar**. Diseño del Sistema de aire acondicionado para un bus tipo turismo [en línea] (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito. 2010 [Consulta: 21 febrero 2021]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2556/1/CD-3239.pdf>

**ÇENGEL, Y. & GHAJAR, A.** *Transferencia de Calor y Masa*. [en línea], 4ª ed. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2013, [Consulta: 17 febrero 2021]. Disponible en: <https://itscv.edu.ec/wp-content/uploads/2019/06/Transferencia-de-calor-y-masa.-Fundamentos-y-aplicaciones-Cuarta-Edici%C3%B3n.pdf>

**CONCEIÇÃO, Eusebio.; et al.** “A Computational Model to Simulate the Thermal Behaviour of the Passengers Compartment of Vehicles”. *SAE International Journal of Commercial Vehicles* [en línea], 2018. 724. [Consulta: 27 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-computational-model-to-simulate-the-thermal-of-of-Conceicao-Silva/133ea225115ce488b399ea023372c7e89c9adf68>

**DADOUR, I.; et al.** 2011. “Temperature variations in a parked vehicle”. *Forensic Science International* [en línea], 2010, 207(1–3), pp. 205–211. [Consulta: 20 febrero 2021]. ISSN 0379-0738. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.10.009>.

**DEL VALLE, Luis.** *DS18B20 sensor de temperatura para líquidos con Arduino*. [blog]. 2016. [Consulta: 4 marzo 2021]. Disponible en: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>.

**FARRINGTON, R. & RUGH, J.,** “Impact of Vehicle Air-Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range”. National Renewable Energy Laboratory [en línea], 2000 (Washington) p. 12. [Consulta: 6 marzo 2021]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/28960.pdf>

**FAYAZBAKSH, Mohammad. & BAHRAMI, Majid.** “Comprehensive modeling of vehicle air conditioning loads using heat balance method”. *SAE Technical Papers*, [en línea], 2013. 2(10), [Consulta: 10 marzo 2021]. ISSN 26883627. Disponible en: <https://fddocuments.in/document/comprehensive-modeling-of-vehicle-air-conditioning-loads-using-heat-balance.html>

**GARCÍA, A.,** Confort térmico y cuerpo humano. [en línea]. 2019. [Consulta: 29 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano>

**GARCÍA, Gilbert.** “Vidrios en el automóvil: tipos, características y denominación”. *Prueba de Ruta* [en línea]. 2017. [Consulta: 20 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.pruebaderuta.com/vidrios-en-el-automovil-tipos-caracteristicas-y-denominacion.php>.

**INCROPERA, F. & DEWITT, D.,** *Fundamentos de transferencia de calor* [en línea]. 4ª ed. Mexico: Cliff Rabichaud, 2013. [Consulta: 12 abril 2021]. ISBN 9788578110796. Disponible en: [https://www.academia.edu/37028342/Fundamentos\\_de\\_transferencia\\_de\\_calor\\_Frank\\_Incropera](https://www.academia.edu/37028342/Fundamentos_de_transferencia_de_calor_Frank_Incropera).

**KHAYYAM, H.; et al.** “Coordinated energy management of vehicle air conditioning system”. *Applied Thermal Engineering* [en línea], 2011, 31(5), pp. 750–764. [Consulta: 13 marzo 2021]. ISSN 13594311 Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.022>

**LEVINSON, R.; et al.** “Potential benefits of solar reflective car shells: Cooler cabins, fuel savings and emission reductions”. *Applied Energy* [en línea], 2011, 88(12), pp. 4343–4357. [Consulta: 16 marzo 2021]. ISSN 0306-2619. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.006>

**MARCOS, D.; et al.** 2014. “The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle”. *Applied Thermal Engineering* [en línea], 66(1–2), pp. 646–656. [Consulta: 18 marzo 2021]. ISSN 13594311. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.054>

**MAXIM INTEGRATED**, “DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer”. Maxim Integrated [en línea], 2019. (Estados Unidos) [Consulta: 02 abril 2021]. Disponible en: <https://www.mouser.ec/new/maxim-integrated/maxim-ds18b20-thermometers/>

**OLAZO, Y.**, Análisis Térmico de una Ventana de Vidrio Doble con Película de Control Solar [en línea]. 2012. [Consulta: 20 febrero 2021]. Disponible en: <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/1199/MD-RPIM2012027.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

**REAL AUTOMÓVIL CLUB DE CATALUÑA**, “Efecto de la radiación solar en la temperatura interior del vehículo”. [en línea], 2015. [Consulta: 07 marzo 2021]. Disponible en: <http://s01.s3c.es/imag/doc/2015-08-06/estudio-sol-coche-racc.pdf>

**TORREGROSA, B.; et al.** “Transient thermal model of a vehicle’s cabin validated under variable ambient conditions”. *Applied Thermal Engineering* [en línea], 2015. 75, pp. 45–53. [Consulta: 22 marzo 2021]. ISSN 13594311. Disponible en: Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.074>.

**TSENG, C.; et al.** 2014. “Thermal Accumulation in a General Car Cabin Model”. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (JFFHMT)* [en línea], 2014. pp. 48–56. [Consulta: 28 marzo 2021]. Disponible en: <https://jffhmt.avevia.com/2014/008.html>

**VÁSCONEZ, D.** “Desarrollo de un modelo para el cálculo del consumo de climatización en vehículos de pasajeros urbanos”. [en línea]. 2019. [Consulta: 12 abril 2021]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=250422>.

**WALEED, A.; et al.** “Temperature variations in a parked car exposed to direct sun during hot and dry climates”. *International Journal of Automobile Engineering*. 2013 3(1), pp. 75-80 [Consulta: 12 abril 2021]. Disponible en: <http://www.tjprc.org/publishpapers/2-23-1362227595-9%20-Temperature%20-full.pdf>

## ANEXOS

### ANEXO A: PROGRAMACIÓN PARA REGISTRO DE DATOS DE LA CABINA

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
const int pinDatosDQ = 5;

// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);

// Variables con las direcciones únicas de los 4 sensores DS18B20
DeviceAddress sensor1 = {0x28, 0xBC, 0x22, 0x5B, 0x4F, 0x20, 0x01, 0xA2};
DeviceAddress sensor2 = {0x28, 0xFF, 0x0B, 0x14, 0x52, 0x17, 0x03, 0x84};
DeviceAddress sensor3 = {0x20, 0x2E, 0xB5, 0x60, 0x9D, 0x20, 0x01, 0x6A};
DeviceAddress sensor4 = {0x28, 0xF1, 0xCB, 0x43, 0x4F, 0x20, 0x01, 0x90};
DeviceAddress sensor5 = {0x28, 0xFC, 0xB3, 0x67, 0x4F, 0x20, 0x01, 0xF7};
DeviceAddress sensor6 = {0x28, 0x29, 0x52, 0x6A, 0x4F, 0x20, 0x01, 0x52};
DeviceAddress sensor7 = {0x28, 0x97, 0xB9, 0x70, 0x4F, 0x20, 0x01, 0x42};
DeviceAddress sensor8 = {0x20, 0x01, 0xC1, 0x3A, 0x4F, 0x20, 0x01, 0xB2};
DeviceAddress sensor9 = {0x28, 0x18, 0x2F, 0x6F, 0x4F, 0x20, 0x01, 0x68};
DeviceAddress sensor10 = {0x28, 0x52, 0x94, 0xB8, 0x4D, 0x20, 0x01, 0x4D};

void setup() {
  // Iniciamos la comunicación serie
  Serial.begin(9600);
  // Iniciamos el bus 1-Wire
  sensorDS18B20.begin();

  // Buscamos los sensores conectados
  Serial.println("Responde a pines: ");
  Serial.println("Encontrados: ");
  Serial.print(sensorDS18B20.getDeviceCount());
  Serial.println(" sensores");
}

void loop() {

  // Mandamos comandos para toma de temperatura a los sensores
  sensorDS18B20.requestTemperatures();

  // Leemos y mostramos los datos de los sensores DS18B20 por dirección única
  Serial.print("Temperatura sensor 1: ");
  Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor1));
  Serial.println(" C");
  Serial.print("Temperatura sensor 2: ");
```

```
Serial.print("Temperatura sensor 3: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor3));
Serial.println(" C");
Serial.print("Temperatura sensor 4: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor4));
Serial.println(" C");
Serial.print("Temperatura sensor 5: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor5));
Serial.println(" C");
Serial.print("Temperatura sensor 6: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor6));
Serial.println(" C");
Serial.print("Temperatura sensor 7: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor7));
Serial.println(" C");
Serial.print("Temperatura sensor 8: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor8));
Serial.println(" C");
Serial.print("Temperatura sensor 9: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor9));
Serial.println(" C");
Serial.print("Temperatura sensor 10: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor10));
Serial.println(" C");
```

## ANEXO B: PROCEDIMIENTO PARA CÁLCULO DE TEMPERATURAS

Definiciones

$$\dot{Q}_{wse} = 2703$$

$$h_{wse} = 1$$

$$h_e = 1$$

$$e_{ws} = 0.9$$

$$\alpha = 5.67 \cdot 10^{-8}$$

$$T_{ext} = 25 + 273$$

$$T_{sky} = 18 + 273$$

$$T_{air} = 23 + 273$$

$$h_{ext} = 1$$

$$h_{ext} = 1$$

$$e_{ext} = 0.01$$

Paso 2

$$T_{ws} = 273$$

Dado

$$h_e \cdot A_{ws} \cdot (T_{ws} - T_{ext}) + \varepsilon_{ws} \cdot \alpha \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse}^4 - T_{sky}^4) = A_{ws} \cdot G_{wsa}$$

$$T_{ws} = \text{Find}(T_{ws}) = 325.7603$$

Paso 3 :

$$Q_{ws} = h_{ws} \cdot A_{ws} \cdot (T_{ws} - T_{air}) = 27.7603$$

Paso 4:

$$T_{wse} = 300$$

Dado

$$h_e \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse} - T_{ext}) + \varepsilon_{ws} \cdot \alpha \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse}^4 - T_{sky}^4) = Q_{ws} + A_{ws} \cdot G_{wsa}$$

$$T_{wse} = \text{Find}(T_{wse}) = 329.1592$$

Paso 5 : Recalcular TwS

Dado

$$Q_{ws} = \frac{k_{ws} \cdot A_{ws}}{e_{ws}} \cdot (T_{wse} - T_{ws})$$

$$T_{ws} = \text{Find}(T_{ws}) = 328.8816$$

Paso 3 recalcular Qws

$$Q_{ws} = h_{ws} \cdot A_{ws} \cdot (T_{ws} - T_{air}) = 30.8816$$

Paso 4: recalcular Twse

$$T_{wse} = 300$$

Dado

$$h_e \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse} - T_{ext}) + \varepsilon_{ws} \cdot \alpha \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse}^4 - T_{sky}^4) = Q_{ws} + A_{ws} \cdot G_{wsa}$$

$$T_{wse} = \text{Find}(T_{wse}) = 329.5356$$

Paso 5: Recalcular  $T_{ws}$

Dado

$$Q_{ws} = \frac{k_{ws} \cdot A_{ws}}{e_{ws}} \cdot (T_{wse} - T_{ws})$$

$$T_{ws} = \text{Find}(T_{ws}) = 329.2268$$

Paso 3: Recalcular  $Q_{ws}$

$$Q_{ws} = h_{ws} \cdot A_{ws} \cdot (T_{ws} - T_{air}) = 31.2268$$

Paso 4: Recalcular  $T_{wse}$

$$T_{wse} = 300$$

Dado

$$h_e \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse} - T_{ext}) + \varepsilon_{ws} \cdot \alpha \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse}^4 - T_{sky}^4) = Q_{ws} + A_{ws} \cdot G_{wsa}$$

$$T_{wse} = \text{Find}(T_{wse}) = 329.5772$$

Paso 5: Recalcular  $T_{ws}$

Dado

$$Q_{ws} = \frac{k_{ws} \cdot A_{ws}}{e_{ws}} \cdot (T_{wse} - T_{ws})$$

$$T_{ws} = \text{Find}(T_{ws}) = 329.2649$$

Paso 3: Recalcular  $Q_{ws}$

$$Q_{ws} = h_{ws} \cdot A_{ws} \cdot (T_{ws} - T_{air}) = 31.2649$$

Paso 4: recalcular  $T_{wse}$

$$T_{wse} = 300$$

Dado

$$h_e \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse} - T_{ext}) + \varepsilon_{ws} \cdot \alpha \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse}^4 - T_{sky}^4) = Q_{ws} + A_{ws} \cdot G_{wsa}$$

$$T_{wse} = \text{Find}(T_{wse}) = 329.5818$$

Paso 5: Recalcular  $T_{ws}$

Dado

$$Q_{ws} = \frac{k_{ws} \cdot A_{ws}}{e_{ws}} \cdot (T_{wse} - T_{ws})$$

$$T_{ws} = \text{Find}(T_{ws}) = 329.2691$$

Paso 3: Recalcular  $Q_{ws}$

$$Q_{ws} = h_{ws} \cdot A_{ws} \cdot (T_{ws} - T_{air}) = 31.2691$$

Paso 4: recalcular  $T_{wse}$

$$T_{wse} = 300$$

Dado

$$h_e \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse} - T_{ext}) + \varepsilon_{ws} \cdot \alpha \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse}^4 - T_{sky}^4) = Q_{ws} + A_{ws} \cdot G_{wsa}$$

$$T_{wse} = \text{Find}(T_{wse}) = 329.5823$$

Paso 5: Recalcular  $T_{ws}$

Dado

$$Q_{ws} = \frac{k_{ws} \cdot A_{ws}}{e_{ws}} \cdot (T_{wse} - T_{ws})$$

$$T_{ws} = \text{Find}(T_{ws}) = 329.2696$$

## ANEXO C: DETERMINACIÓN DE DIRECCIÓN ÚNICA DE SENSORES.

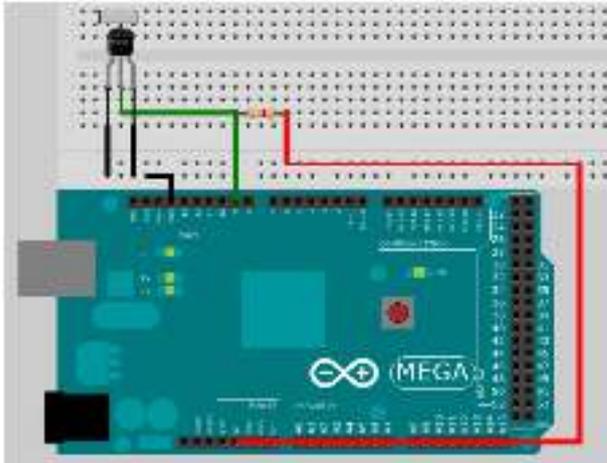
El Código programado en Arduino se indica en la siguiente figura

```
Verificar_sensor §
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
const int pinDatosDQ = 50;
// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);
void setup() {
    // Iniciamos monitor serie y sensor de temperatura DS18B20
    Serial.begin(9600);
    sensorDS18B20.begin();
    // Buscamos los sensores conectados
    Serial.println("Buscando dispositivos...");
    Serial.println("Encontrados: ");
    int numeroSensoresConectados = sensorDS18B20.getDeviceCount();
    Serial.print(numeroSensoresConectados);
    Serial.println(" sensores");
    // Si hemos encontrado uno mostramos su dirección
    if(numeroSensoresConectados==1){
        // Tipo definido como una array de 8 bytes (uint8_t)
        DeviceAddress sensorTemperatura;
        // Obtenemos dirección
        sensorDS18B20.getAddress(sensorTemperatura, 1);
        // Mostamos por el monitor serie
        Serial.print("Sensor encontrado: ");
        // Recorremos los 8 bytes del identificador único
        for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
        {
            // Si solo tiene un dígito rellenamos con un cero a la izquierda
            if (sensorTemperatura[i] < 16) Serial.print("0");
            // Mostramos los datos que van en HEXADECIMAL
            Serial.print(sensorTemperatura[i], HEX);
        }
    }
}

void loop() {
}
```

Para identificar se parte de la afirmación donde solo un sensor debe ser conectado y se lo tendrá que repetir para cada sensor. El esquema de conexión se representa de la siguiente manera :



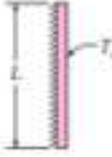
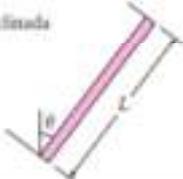
### Conexión para identificación del sensor al Arduino

#### Dirección del sensor

- Sensor 1: 28BC225B4F2001A2
- Sensor 2: 28FF0B1462170384
- Sensor 3: 282BE5684D20016A
- Sensor 4: 28F1CB434F200190
- Sensor 5: 28FCB3674F2001F7
- Sensor 6: 2829526A4F200152
- Sensor 7: 2897DF704F200142
- Sensor 8: 2881C13A4F20018E
- Sensor 9: 28182F6F4F200188
- Sensor 10: 285294BB4D20014D

**ANEXO D: PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN.**

**Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies**

Configuración geométrica	Longitud característica $L_c$	Intervalo de Ra	$Nu$
<p>Placa vertical</p> 	$L$	$10^4 - 10^8$ $10^{10} - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.493/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right]^2$ (9-21) (compleja pero más exacta)
<p>Placa inclinada</p> 	$L$		Utilícense las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente  Reemplácese $g$ por $g \cos \theta$ para $0 < \theta < 60^\circ$
<p>Placa horizontal (Área superficial <math>A</math> y perímetro <math>p</math>)                      a) Superficie superior de una placa caliente (o superficie inferior de una placa fría)</p> 	$A/p$	$10^5 - 10^7$ $10^7 - 10^{11}$	$Nu = 0.54Ra_L^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra_L^{1/3}$ (9-23)
<p>b) Superficie inferior de una placa caliente (o superficie superior de una placa fría)</p> 		$10^5 - 10^{11}$	$Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$ (9-24)
<p>Cilindro vertical</p> 	$L$		Un cilindro vertical puede tratarse como una placa vertical cuando:  $D \geq \frac{35L}{Gr^{1/4}}$
<p>Cilindro horizontal</p> 	$D$	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left[ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.553/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right]^2$ (9-25)
<p>Esfera</p> 	$D$	$Ra_D \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0.7)$	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.403/Pr)^{1/4}]^{1/4}}$ (9-26)

## ANEXO E: PROPIEDADES DE DIFERENTES SUSTANCIAS

Masa molar, constante de gas y calores específicos de gas ideal de algunas sustancias					
Sustancia	Masa molar M, kg/kmol	Constante de gas R, kJ/kg-K*	Datos de calores específicos a 25°C		
			$C_p$ , kJ/kg-K	$C_v$ , kJ/kg-K	$k = C_p/C_v$
Aire	28.97	0.2870	1.005	0.7180	1.400
Amoníaco, NH <sub>3</sub>	17.03	0.4882	2.093	1.0605	1.904
Argón Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Bromo, Br <sub>2</sub>	159.81	0.05202	0.2253	0.1732	1.300
n-Butano, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	0.1430	1.694	1.551	1.092
Cloro, Cl <sub>2</sub>	70.905	0.1173	0.4781	0.2908	1.625
Clorodifluorometano (R-22), CHClF <sub>2</sub>	86.47	0.09615	0.6496	0.5535	1.174
Dióxido de Azufre, SO <sub>2</sub>	64.06	0.1298	0.6228	0.4930	1.263
Dióxido de Carbono, CO <sub>2</sub>	44.01	0.1889	0.8439	0.6550	1.288
Dióxido de Nitrógeno NO <sub>2</sub>	46.006	0.1889	0.8060	0.6171	1.306
Etano, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	0.2765	1.741	1.468	1.188
Etileno, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Flúor, F <sub>2</sub>	38.00	0.2187	0.8237	0.6050	1.362
Helio, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
n-Heptano, C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.20	0.08297	1.649	1.566	1.053
n-Hexano, C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.18	0.09647	1.654	1.558	1.062
Hidrógeno, H <sub>2</sub>	2.016	4.124	14.30	10.18	1.405
Isobutano, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	0.1430	1.663	1.520	1.094
Kriptón, Kr	83.80	0.09921	0.2480	0.1488	1.667
Metano, CH <sub>4</sub>	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Monóxido de Carbono, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.400
Neón, Ne	20.183	0.4119	1.030	0.6180	1.667
Nitrógeno N <sub>2</sub>	28.01	0.2968	1.040	0.7429	1.400
Óxido Nítrico, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Oxígeno, O <sub>2</sub>	32.00	0.2598	0.9180	0.6582	1.395
n-Pentano, C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.15	0.1152	1.664	1.549	1.074
Propano C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.1885	1.669	1.480	1.127
Propileno, C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.08	0.1976	1.531	1.333	1.148
Tetrafluorometano, CCl <sub>4</sub>	153.82	0.05405	0.5415	0.4875	1.111
Tetrafluoroetano (R-134 <sup>a</sup> ), C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	102.03	0.08149	0.8334	0.7519	1.108
Trifluoroetano (R-143 <sup>a</sup> ), C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	84.04	0.09893	0.9291	0.8302	1.119
Vapor de Agua, H <sub>2</sub> O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Xenón, Xe	131.30	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

\*La unidad kJ/kg-K es equivalente a kJ/m<sup>3</sup>-kg-K. La constante de gas se calcula a partir de  $R = R_u/M$ , donde  $R_u = 8.31447$  kJ/kmol-K es la constante universal de gas y M es la masa molar.

Fuente: Los valores de calores específicos se obtienen principalmente a partir de los procedimientos para propiedades preparadas por The National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.

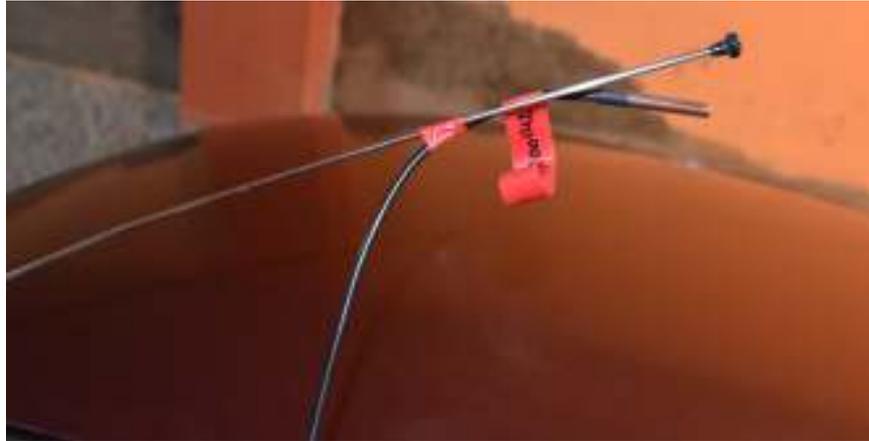
## ANEXO F: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS EXPERIMENTALES



**Ilustración 1:** Ubicación de sensores dentro de la cabina para los ensayos 1 y 2



**Ilustración 2:** Ubicaciones de sensores en los asientos conductor y pasajero



**Ilustración 3:** Ubicación del sensor 7 sensor de temperatura ambiente



**Ilustración 4:** Comprobación del funcionamiento de la programación.



**Ilustración 5:** Conexiones para verificación del funcionamiento de sensores



**Ilustración 6:** Ubicación del sensor 6, parabrisas posterior



**Ilustración 7:** Ubicación del sensor 1 parabrisas



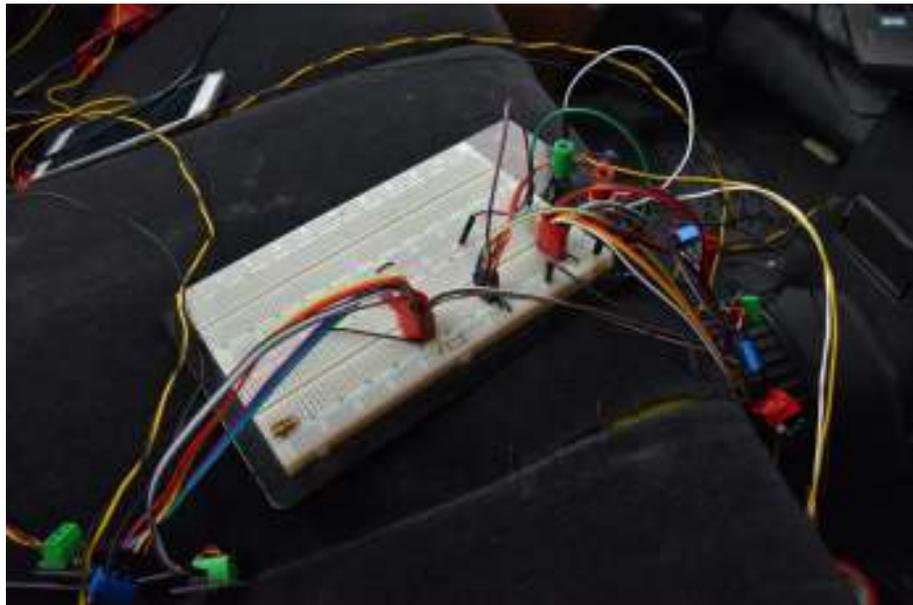
**Ilustración 8:** Verificación de las conexiones



**Ilustración 9:** Ubicación del generador de calor dentro de la cabina



**Ilustración 10:** Ubicación de sensores en los asientos traseros de la cabina



**Ilustración 11:** Conexiones de los sensores a la protoboard



**Ilustración 12:** Recolección de datos



**Ilustración 13:** Ubicación del vehículo para la adquisición de datos sin incidencia solar



**Ilustración 14:** Ubicación del medidor de radiación solar para el ensayo 3 con incidencia solar



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO  
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS  
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN  
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS**



REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

**Fecha de entrega:** 04/10/2021

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
JUAN MIGUEL TRUJILLO TELLO / CHRISTIAN JAVIER MACHADO SOLÍS
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>FACULTAD:</b> FACULTAD DE MECÁNICA
<b>CARRERA:</b> INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
<b>TÍTULO A OPTAR:</b> INGENIERO AUTOMOTRIZ
f. Analista de bibliotecas responsable: