

Research Article

# Analysis of the Thermal Behavior of a Vehicle Cabin Using a Dynamic Thermal Model

## Análisis del Comportamiento Térmico de la Cabina de un Vehículo Utilizando un Modelo Térmico Dinámico

Juan Trujillo-Tello<sup>1</sup>, Christian Machado-Solís<sup>2</sup>, Daniela C. Vásconez-Núñez<sup>3</sup>, and Fernando M. Tello-Oquendo<sup>3\*</sup>

IV INTERNATIONAL  
CONGRESS OF  
ENGINEERING FACULTY OF  
MECHANICS (IV COINTI  
2021)

Corresponding Author:  
Fernando M. Tello-Oquendo;  
email: fernando.tello@epoch.edu.ec

Published: 31 August 2022

Production and Hosting by  
Knowledge E

© Juan Trujillo-Tello  
et al. This article is distributed  
under the terms of the  
Creative Commons  
Attribution License, which  
permits unrestricted use and  
redistribution provided that  
the original author and  
source are credited.

<sup>1</sup>Investigador Independiente, Juan Pío Montufar y Manuel Alfaréz Cajías, Cuenca, Ecuador

<sup>2</sup>Multirepca, Av. Alberto Rosero y Destacamento Cueva de los Tayos, Ambato, Ecuador

<sup>3</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Industrial, Grupo GIDENM, Riobamba, Ecuador

### ORCID

Fernando M. Tello-Oquendo: 0000-0002-2551-9648

### Abstract

This work analyzes the thermal behavior of a vehicle cabin by using a dynamic thermal model, which allows to accurately reproduce the vehicle interior temperature under different external environmental conditions. The thermal model considers heat transfer through the glazed and opaque surfaces of the vehicle using the energy balance method. It considers changes in weather conditions, vehicle geometry, body construction characteristics, types of opaque and glazed surfaces, and existing thermal loads. Experimental tests (with and without solar radiation) were carried out to validate the dynamic thermal model. The model predicts the temperature variations of the air inside the vehicle cabin. The results showed a maximum variation of 1.38 K without solar incidence and 3.78 K with solar radiation.

**Keywords:** *dynamic thermal model, vehicle, heat balance, thermal load.*

### Resumen

El objetivo principal del presente trabajo fue analizar el comportamiento térmico de la cabina de un vehículo utilizando un modelo térmico dinámico, que permite reproducir de manera precisa el comportamiento de la temperatura interior del vehículo bajo distintas condiciones ambientales externas. El modelo térmico considera la transferencia de calor a través de las superficies acristaladas y opacas del vehículo utilizando el método de balance de energía, para lo cual se toman en cuenta los cambios en las condiciones climatológicas, la geometría del vehículo, las características constructivas de la carrocería, tipos de superficies opacas y acristaladas y las cargas térmicas existentes. Se realizaron ensayos experimentales (con y sin radiación solar) para validar el modelo térmico dinámico. El modelo permite reproducir las variaciones de la temperatura del aire interior de la cabina del vehículo. Los resultados obtenidos muestran una variación máxima de 1.38 K, sin incidencia solar y 3.78 K con radiación solar.

**Palabras Clave:** *modelo térmico dinámico, vehículo, balance de calor, carga térmica.*

 OPEN ACCESS



## 1. Introducción

El sistema de aire acondicionado (A/C) controla la temperatura y humedad relativa dentro de un rango establecido por el conductor o las personas que se encuentren en el interior de la cabina de un vehículo. Sin embargo, los sistemas de A/C representan el mayor consumo de energía de los componentes auxiliares de los vehículos eléctricos y la carga auxiliar principal en el motor de un vehículo cuando está en funcionamiento. En vehículos eléctricos los sistemas de aire acondicionado provocan una disminución promedio de aproximadamente un 30-40% en el rango de conducción dependiendo del tamaño del aire acondicionado y el ciclo de conducción [1]. Farrington y Rugh [2] determinaron que el aire acondicionado es utilizado entre un 43-49% durante el uso total del vehículo. Los sistemas de aire acondicionado (A/C) aumentan significativamente el consumo de energía de un vehículo e influyen negativamente en su rendimiento. Rugh, Hovland y Andersen [3] afirman que el sistema auxiliar de mayor consumo en el vehículo es el sistema de aire acondicionado, con un consumo entre 5-6 kW de la potencia entregada por el motor, lo que equivale al consumo de un hogar pequeño con aire acondicionado convencional. Farrington y Rugh [2] en su experimentación comprobó que el sistema de aire acondicionado del vehículo consume entre el 5-20% de la potencia neta entregada por el motor de combustión interna.

Los principales factores que influyen en el rendimiento del sistema de aire acondicionado y en su consumo son la radiación solar incidente sobre las superficies del vehículo, la carga térmica por ocupación, la velocidad del vehículo y la temperatura de consigna del sistema A/C (temperatura a la que el usuario necesita que se mantenga el aire interior de la cabina para mantenerse en confort térmico) [4].

Las investigaciones realizadas sobre el equipo A/C muestran que se puede lograr ahorros significativos, tanto en términos de costos de funcionamiento como en los efectos sobre el medio ambiente, al operar el sistema A/C de manera inteligente. Khayyam et al. [5] desarrolló un algoritmo inteligente (sistema Intelligent Energy Management Control (IEMC)) para contrarlar el sistema de aire acondicionado; los autores optimizaron el funcionamiento integrado del aire acondicionado y el motor bajo varios patrones de conducción. Este sistema redujo el uso de energía en las condiciones de simulación en aproximadamente un 3% en comparación con el uso del controlador de aire acondicionado ordinario. Por otro lado, Suzuki y Ishii [6] compararon el sistema de aire acondicionado entre el vehículo convencional y el vehículo eléctrico. Los autores propusieron un sistema de bomba de calor para vehículos eléctricos, en el que utilizaron una válvula de 4 vías, dos válvulas de expansión y varias válvulas de retención para invertir la dirección del flujo de refrigerante. Este sistema proporciona refrigeración y



calefacción. Los resultados experimentales mostraron que para temperaturas ambiente de 40°C y -10°C, las capacidades de refrigeración y calefacción del sistema fueron de 2,9 kW y 2,3 kW y el COP de 2,9 y 2,3, respectivamente. Lee et al. [7] estudiaron los efectos del aire acondicionado en vehículos eléctricos utilizando varios modos de conducción. Los autores concluyeron que el aire acondicionado provoca una disminución media de alrededor del 33% en la autonomía de un vehículo. Lee et al. [8] desarrollaron un modelo térmico transitorio de la cabina de un vehículo para investigar el comportamiento térmico de la cabina utilizando diferentes refrigerantes. El modelo desarrollado se validó comparándolo con datos experimentales. Los resultados mostraron una desviación máxima del 5%. Hemmati et al. [9] desarrollaron una plataforma para optimizar el funcionamiento del sistema de calefacción en vehículos eléctricos híbridos. Los resultados mostraron un ahorro de energía del vehículo entre el 10% y el 26 % al realizar pruebas en programas de conducción con dinamómetro y ciclos de conducción reales en Estados Unidos.

Los estudios anteriormente analizados han sido enfocados en determinar el consumo del sistema A/C en condiciones ambientales extremas, como en las ciudades de Europa y Asia. Sin embargo, todavía no se han realizado estudios para determinar el consumo del sistema en condiciones ambientales como las que se tienen en la zona de la sierra ecuatoriana. Para conocer el consumo del aire acondicionado se debe determinar cuánta energía debe suministrar el sistema A/C para mantener el interior del vehículo en condiciones de confort térmico (temperatura y humedad).

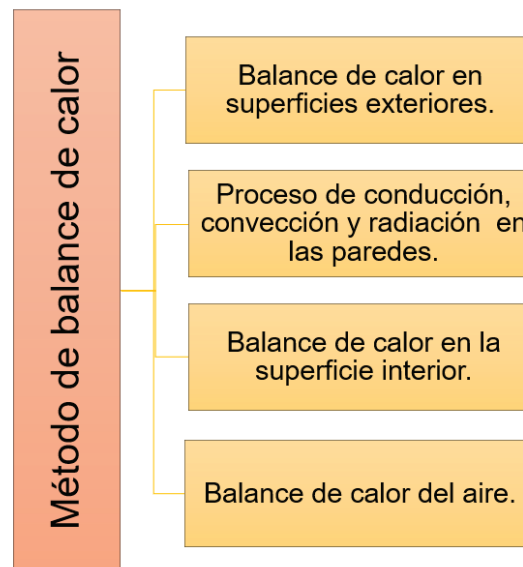
El método de balance de calor es uno de los métodos recomendados por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado [10] para calcular la carga térmica en espacios climatizados. En los últimos años, el método de balance de calor ha sido perfeccionado y utiliza ecuaciones de transferencia de calor a través de balance de energía. Este método considera todos los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) en cada una de las superficies internas y externas (opacas y acristaladas) de la cabina del vehículo.

Este artículo presenta un modelo térmico dinámico de la cabina de un vehículo desarrollado en Matlab, que permite simular la evolución de la temperatura del aire interior de la cabina del vehículo bajo diferentes condiciones ambientales externas.

## 2. Materiales y Métodos

**Modelo térmico dinámico** El método de balance de calor se utilizó para modelar la cabina del vehículo (Ver Figura 1). Ecuaciones de transferencia de calor por convección, radiación y conducción se utilizaron en los balances de energía realizadas en cada

superficie opacas y acristaladas interiores y exteriores. El modelo de la cabina del vehículo se desarrolló en Matlab. La Figura 1, ilustra los cuatro procesos que intervienen en el método de balance de calor. [11]



**Figure 1**

*Metodología de balance de calor.*

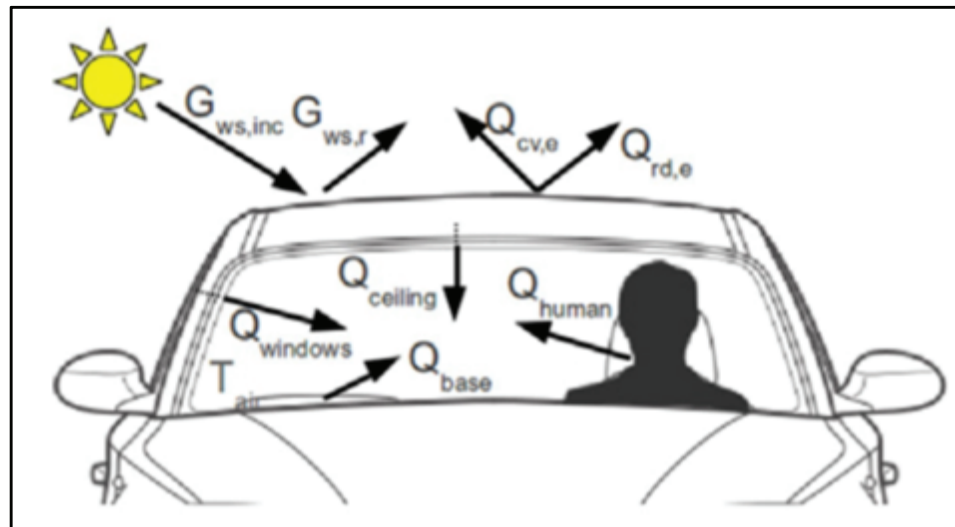
El modelo térmico de la cabina del vehículo está basado en el modelo propuesto por [12]. Este modelo describe dos ecuaciones diferenciales, una ecuación diferencial para determinar la temperatura del aire interior de la cabina como se observa en la ecuación 1 y otra ecuación diferencial para determinar la temperatura de la base de la cabina según la ecuación 2. Dichas ecuaciones consideran los distintos flujos de calor que influyen en la variación de la temperatura interior de la cabina. La Figura 2, muestra los flujos de calor en la cabina del vehículo. Cada superficie opaca del vehículo (puertas, techo y base del vehículo) se componen de diferentes materiales que tienen sus propias características térmicas.

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

Ecuación 1: Calor sensible dentro de la cabina de un vehículo.

Donde:  $m_{air}$ : masas del aire interior (kg/s)  $C_{p_{air}}$ : calor específico del aire interior (J/kgK)  $T_{air}$ : temperatura del aire interior (°C)  $Q_{windows}$ ,  $Q_{ceiling}$ ,  $Q_{gen}$ ,  $Q_{human}$  y  $Q_{base}$ ; flujos de calor convectivo entre las superficies del vehículo y el aire interior. (W)

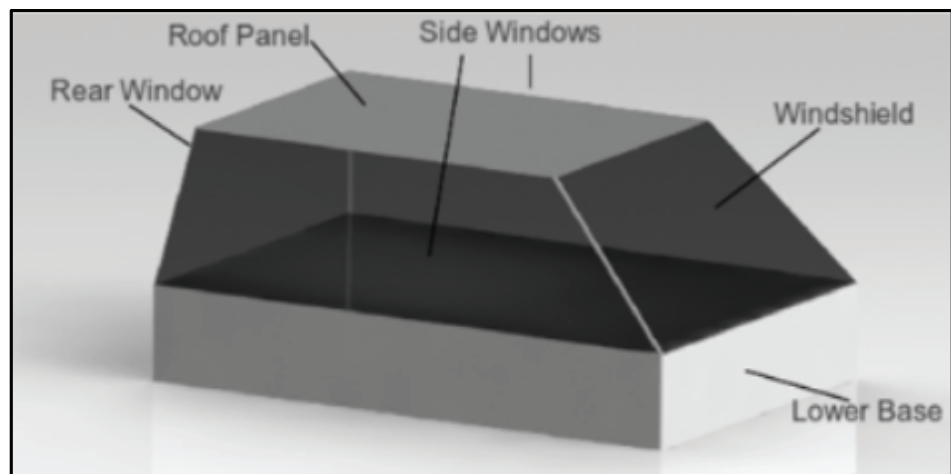
Los asientos, el tablero del interior de la cabina y demás superficies que encuentran en contacto con el aire interior de la cabina están representados por la base inferior



**Figure 2**

*Flujos de calor dentro de la cabina de un vehículo [12].*

(lower base en Figura 3). Por lo tanto, la superficie de la base tiene el área igual a la suma de las áreas de todos los elementos descritos anteriormente. Para facilitar el cálculo del coeficiente de transferencia de calor convectivo en el modelo desarrollado se consideró a todas las superficies que componen la cabina del vehículo como superficies planas como se muestra en la Figura 3.



**Figure 3**

*Flujos de calor dentro de la cabina de un vehículo [12].*

En la transferencia de calor por convección de las ventanas del vehículo se consideraron cuatro superficies diferentes: las ventanas laterales derecha (rsw) e izquierda (lsw), la ventana trasera (rw) y el parabrisas (ws). Se asumió como superficie adiabática a la base inferior de la cabina, lo que significa que no hay pérdidas de calor entre la



superficie de la base con el ambiente exterior. El aire interior de la cabina aumenta su temperatura, debido a la transferencia de calor entre la superficie de la base de la cabina y la radiación incidente en las superficies opacas y acristaladas.

Las ecuaciones 3, 4, 5 y 6 describen la radiación transmitida desde las paredes y el techo, 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. La transmisividad de los cristales corresponde al de un vidrio claro automotriz, que es de 0.78.

$$G_{wst} = \tau_{ws} \cdot G_{wsinc}$$

Ecuación 2: Incidencia solar transmitida a través del parabrisas.

$$G_{rwt} = \tau_{rw} \cdot G_{rwinc}$$

Ecuación 3: Incidencia solar transmitida a través del parabrisas posterior.

$$G_{lswt} = \tau_{lsw} \cdot G_{lswinc}$$

Ecuación 4: Incidencia solar transmitida a través de las ventanas laterales.

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

Ecuación 5: Calor incidente en la base al interior de la cabina del vehículo.

$$G_{ceilingt} = \tau_{ceiling} \cdot G_{roofinc}$$

Ecuación 6: Incidencia solar transmitida a través del techo.

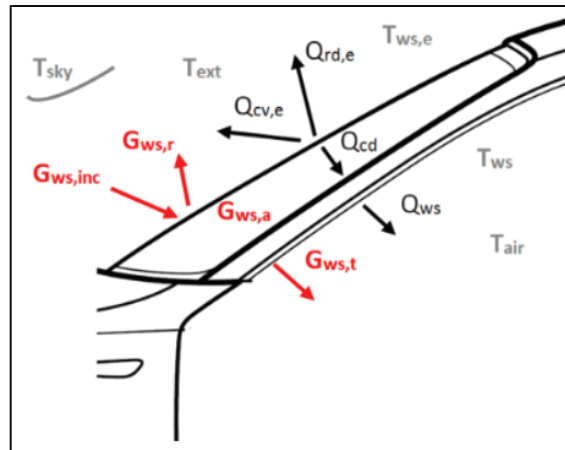
La transferencia de calor convectivo desde las ventanas se calculó utilizando la ecuación 7:

$$Q_{windows} = Q_{ws} + Q_{rw} + Q_{lsw} + Q_{rws}$$

Ecuación 7: Flujo de calor convectivo desde las ventanas.

Donde  $Q_{ws}$  (W),  $Q_{rw}$  (W),  $Q_{lsw}$  (W) y  $Q_{rws}$  (W) representan los calores convectivos a través de parabrisas, parabrisas posterior, ventana izquierda y ventana derecha, respectivamente.

Las ecuaciones (8, 9, 10) describen los balances de calor utilizados para obtener la temperatura de cada una de las superficies acristaladas del vehículo. La Figura 4 muestra los flujos de calor que inciden sobre las superficies acristaladas. La irradiancia solar incidente ( $G_{ws,inc}$ ) consta de tres componentes: irradiancia solar absorbida ( $G_{ws,a}$ ), reflejada ( $G_{ws,r}$ ) y transmitida ( $G_{ws,t}$ ).



**Figure 4**

*Balance de calor en el parabrisas [12].*

El calor generado por la incidencia de la radiación solar es absorbido por el parabrisas y posteriormente transmitido por conducción a través del vidrio, que luego es intercambiado por convección con el aire al interior de la cabina.

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

$$Q_{cve} + Q_{rde} = Q_{cd} + A_{ws} \cdot G_{wsa}$$

Ecuación 8: Balance de calor en la superficie.

$$Q_{cd} = Q_{ws}$$

Ecuación 9: Flujo de calor conducido.

$$G_{wsa} = \alpha \cdot G_{wsinc}$$

Ecuación 10: Incidencia solar absorbida en la superficie.

Donde:  $Q_{cve}$  : flujo convectivo de calor externo (W),  $Q_{rde}$  : flujo de calor por radiación (W) y  $Q_{cd}$  es el flujo de calor por conducción en el interior de la superficie acristalada



(W). Los flujos de calor que se genera en la superficie del parabrisas se calculan utilizando las ecuaciones (11), (12) y (13):

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

Ecuación 11: Flujo de calor convectivo.

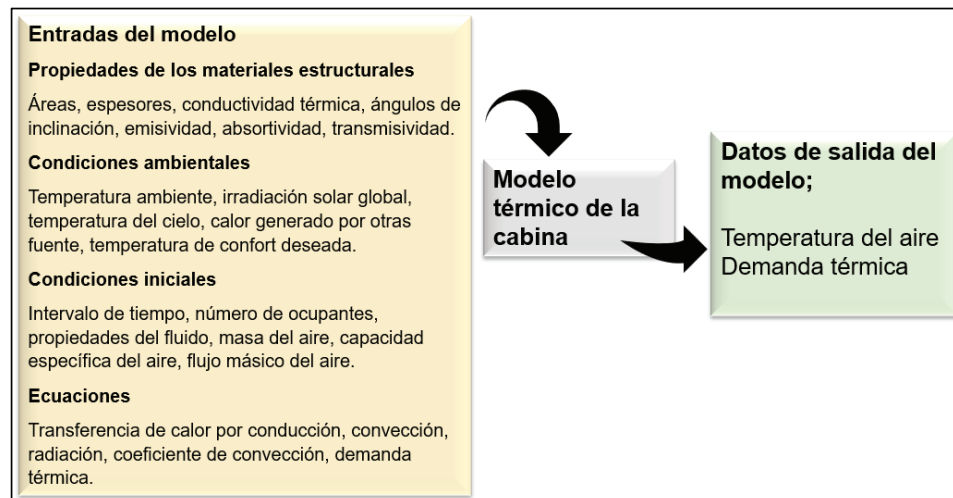
$$Q_{rde} = \epsilon_{ws} \cdot \sigma \cdot A_{ws} \cdot (T_{wse}^4 - T_{sky}^4)$$

Ecuación 12: Flujo de calor por radiación.

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

Ecuación 13: Flujo de calor por conducción. donde:  $A_{ws}$ : área de superficie del parabrisas ( $m^2$ )  $e_{ws}$ : espesor del parabrisas (m)  $T_{ext}$ : temperatura del aire ambiente exterior ( $^{\circ}C$ )  $T_{sky}$  : temperatura del cielo ( $^{\circ}C$ )  $h_e$  : coeficiente externo de transferencia de calor convectivo (W/m K). Se considera el cálculo del coeficiente de convección natural para superficie vertical y horizontal. [13]

Las propiedades térmicas de las ventanas son: conductividad térmica (k), área (A), espesor (e), emisividad de onda larga ( $\epsilon$ ), absorptividad (a), reflectividad (r) y transmisividad (t). La constante Stefan Boltzmann es ( $\sigma$ ).



**Figure 5**

*Esquema de algoritmo para el cálculo de la temperatura interior.*

El modelo desarrollado en Matlab incluye una función general que realiza otras funciones en scripts específicos. Cada script calcula los parámetros globales del modelo.





Un programa void es la función principal que produce dos salidas, que son la temperatura del aire dentro del vehículo y el tiempo de simulación. La simulación comienza con la definición de la función y las variables globales que son las propiedades estructurales de los materiales, las condiciones ambientales, las condiciones iniciales y las correspondientes ecuaciones de transferencia de calor. Estos pasos se detallan en la Figura 5.

## 2.1. Descripción de escenarios experimentales

Para validar el modelo térmico dinámico de la cabina de un vehículo se desarrollaron dos ensayos, uno sin incidencia de la radiación solar para evaluar los parámetros geométricos y constructivos de la cabina del vehículo, y otro ensayo con incidencia de la radiación solar para evaluar la respuesta del modelo bajo cargas térmicas derivadas de las ganancias solares.

## 2.2. Ensayo sin incidencia solar

El ensayo experimental sin incidencia solar se realizó con el vehículo en el interior de un garaje cerrado; se instaló un calefactor eléctrico en el interior de la cabina del vehículo para calentar el aire interior de la cabina, para registrar la variación de temperatura en el interior de la cabina, se utilizaron sensores de temperatura. La Tabla 1 muestran las condiciones en las que se realizaron cada uno de los ensayos.

**Table 1**

*Descripción de escenarios sin incidencia solar.*

	<b>Ensayo sin incidencia solar</b>
Condiciones	Sin incidencia solar, al interior de un garaje.
Duración (h)	4
Instrumentos	DS18B20, Arduino Mega 2560, calefactor
Variables medidas	Temperatura del aire interior. Temperatura ambiente.
Fecha	15/12/20
Ubicación	Ambato

Elaborado por: Autores. Fuente: Propia.

### 2.3. Ensayo con incidencia solar

En el ensayo experimental con incidencia solar, el vehículo se mantuvo estacionado en el exterior y sin presencia de sombras. Se registraron valores de radiación solar en kW/m<sup>2</sup> utilizando un piranómetro que fue ubicado en la parte superior del techo del vehículo. El registro de la temperatura se lo hizo por medio de un Data Logger que fue programado para tomar datos cada dos minutos. Las condiciones para este ensayo se detallan en la Tabla 2 que se muestra a continuación.

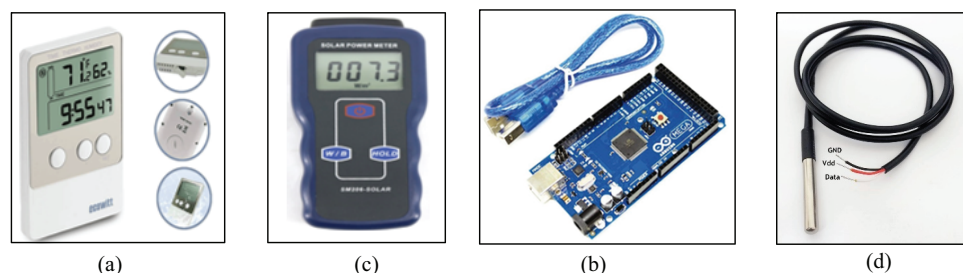
**Table 2**

*Descripción de escenario con incidencia solar.*

Ensayo con incidencia solar	
Condiciones	Bajo incidencia solar, ambiente externo.
Duración (h)	7
Instrumentos	DS12B20, Arduino Mega 2560, Piranómetro MS206, Data Logger – Ecowitt.
Variables medidas	Temperatura del aire interno Temperatura ambiente Irradiación solar.
Fecha	12/05/21
Ubicación	Riobamba

Elaborado por: Autores. Fuente: Propia.

Para realizar los ensayos experimentales se usaron los materiales que se ilustran en la Figura 6.



**Figure 6**

*Materiales utilizados: (a) DataLogger, (b) Piranómetro, (c) Arduino Mega, (d) Sensor temperatura.*

(a) Ecovitt DS102 USB Data Logger, registra los datos de temperatura y humedad en intervalos específicos. (b) Piranómetro MS206-SOLAR, mide la irradiancia solar. (c) Arduino Mega 2560, placa de microcontrolador de circuitos integrados que permiten grabar instrucciones por medio de un lenguaje de programación. (d) Sensores de temperatura digital DS18B20, miden la temperatura del aire en diferentes puntos en el interior del vehículo.

Además, para la simulación de una fuente de calor se utilizó un calefactor eléctrico con una potencia de 750 Watts, el cual se muestra en la Figura 7.



**Figure 7**

*Calefactor eléctrico.*

La ecuación (14) describe el error medio cuadrático (RMS), que se utilizó para determinar el error de los datos de la simulación con los datos experimentales medidos.

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

Ecuación 14: Error medio cuadrático.

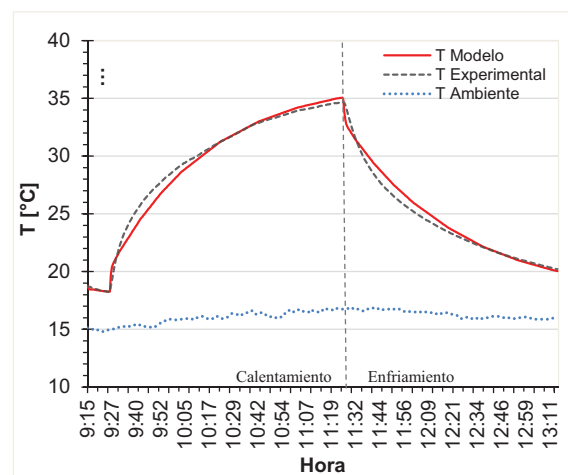
## 2.4. Resultados

La resistencia térmica por conducción y la capacidad calorífica de la base fueron parámetros de ajuste para el modelo de la cabina, donde  $k=9$  W/mK y  $C_{base}=100$  kJ/K. Validación del modelo sin radiación solar

El resultado de la simulación del modelo en el ensayo 1 se muestra en la Figura 8. La temperatura de la cabina al iniciar el ensayo experimental 1, es de alrededor de 18.75 °C a las 9:15 am. Después de 10 minutos, la temperatura descendió a 18.24 °C. En la fase de calentamiento, al encender el calefactor la temperatura en el interior de la cabina se aumentó hasta los 34.67 °C. El calefactor se apagó luego de 2 horas de

funcionamiento hasta las 11:25 am, en este instante comienza la fase de enfriamiento. En esta fase, en los primeros 7 minutos la temperatura del aire descendió rápidamente debido a la inercia térmica de las masas interiores. La fase de enfriamiento terminó a las 1:15 pm, con una temperatura registrada de 20.21 °C.

Para la validación el valor de RMS fue 0.57. Una diferencia de temperatura máxima de 1.30 K entre la curva experimental y la de simulación. En la Figura 8 se puede observar que el modelo térmico dinámico predice correctamente la variación de la temperatura del aire interior del vehículo, tanto en la fase de calentamiento como en la de enfriamiento.



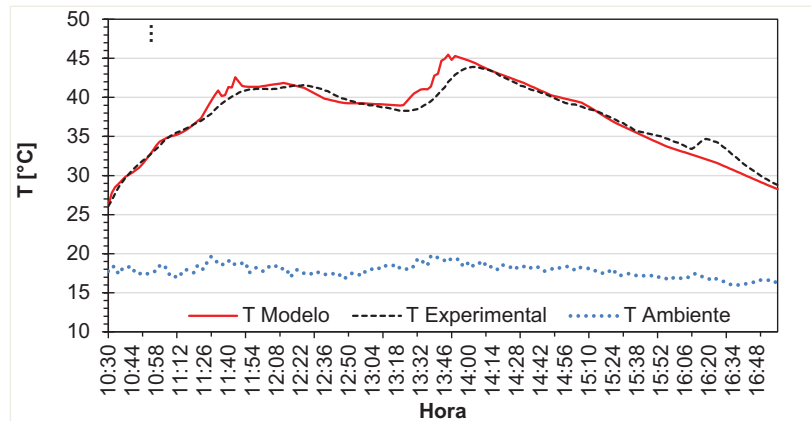
**Figure 8**

*Resultado de validación para ensayo experimental 1.*

## 2.5. Validación del modelo con incidencia solar

El comportamiento térmico de la cabina con incidencia solar se presenta en la Figura 9, en donde la diferencia de temperatura máxima entre los resultados de temperatura experimentales y del modelo es de 3.78 °C, alcanzando una temperatura máxima de 43.9 °C en el ensayo experimental y de 45.46 °C como resultado de las simulaciones.

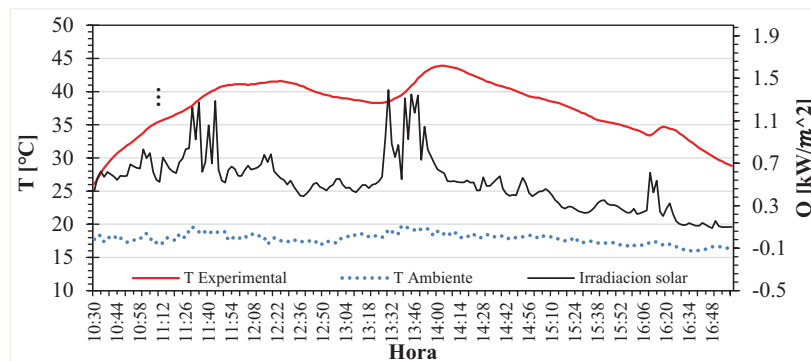
El ensayo comenzó a las 10:30h y terminó a las 17:00h. En la Figura 9 se observa que la temperatura que predice el modelo es similar a la temperatura obtenida al final del ensayo (28.8 °C). El error máximo del modelo térmico tiene un valor de 1.11 RMS para la experimentación 2. La diferencia es de 3.78 K entre la curva de simulación y la experimental en su punto más alto de temperatura. Los picos de temperatura que se observa en la curva experimental obedecen a los efectos de la radiación solar y sus cambios durante el día, los cuales pueden ser variables en función de la nubosidad presente durante el ensayo, como se muestra en la Figura 10. Es por eso que a pesar



**Figure 9**

*Resultado de validación para ensayo experimental 2.*

de que la temperatura ambiente presenta pequeñas variaciones durante el ensayo, la temperatura interior de la cabina del vehículo muestra saltos o picos fluctuantes.



**Figure 10**

*Temperatura ambiente, temperatura interior experimental e irradiación solar durante el ensayo 2.*

### 3. Conclusiones

Un modelo térmico dinámico de la cabina de un vehículo fue desarrollado en Matlab para estimar la variación de temperatura del aire interior bajo varias condiciones ambientales, con y sin la incidencia de la radiación solar. Del presente estudio se desprenden las siguientes conclusiones:

1. La radiación solar es la carga térmica que más influye en la temperatura dentro de la cabina, y depende de diferentes parámetros correspondientes a la geometría y composición de la carrocería, ubicación del vehículo y tiempo de exposición.



2. La conductividad térmica del techo, la capacidad calorífica de la base fueron los parámetros de ajuste del modelo térmico de la cabina del vehículo.
3. La variación máxima de temperatura interior entre los resultados del modelo y las mediciones experimentales son de 1.38K para el vehículo sin la incidencia de la radiación solar y de 3.78 K para el vehículo bajo la incidencia de la radiación solar.
4. El modelo desarrollado puede ser utilizado para determinar el valor de demanda térmica que se genera dentro de la cabina y a su vez es una herramienta para el diseño y pruebas del sistema de climatización, sus efectos en el rendimiento y consumo de combustible.

## References

- [1] Zhang Z, Wang J, Feng X, Chang L, Chen Y, Wang X. The solutions to electric vehicle air conditioning systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;91:443–463.
- [2] Farrington RB, Rugh JP. NREL. Impact of vehicle air-conditioning on fuel economy, tailpipe emissions and electric vehicle range. To Be Presented at the Earth Technologies Forum [Preprint]. 2000. Available from <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/28960.pdf>
- [3] Rugh J, Hovland V, Andersen SO. NREL. Significant fuel savings and emission reductions by improving vehicle air conditioning. In: *Mobile Air Conditioning Summit*; Washington, DC. 2004. Available from <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/62232.pdf>
- [4] Zhang Z, Li W, Zhang C, Chen J. Climate control loads prediction of electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*. 2017;110:1183–1188.
- [5] Khayyam H, Nahavandi S, Hu E, Kouzani A, Chonka A, Abawajy J, et al. Intelligent energy management control of vehicle air conditioning via look-ahead system. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(16):3147–3160.
- [6] Suzuki T, Ishii K. Air conditioning system for electric vehicle. *Sae Technical*. 2018:960688.
- [7] Lee JT, Kwon S, Lim Y, Chon MS, Kim D. Effect of air-conditioning on driving range of electric vehicle for various driving modes. *Sae Technical Papers*. 2013;1:5.
- [8] Lee H, Hwang Y, Song I, Jang K. Transient thermal model of passenger car's cabin and implementation to saturation cycle with alternative working fluids. *Energy*. 2015;90:1859–1868. ASHRAE. *Principle of heating ventilating and air conditioning*. S.I.: John Wiley & Sons, Inc.; 2017.



- [9] Hemmati S, Doshi N, Hanover D, Morgan C, Shahbakhti M. Integrated cabin heating and powertrain thermal energy management for a connected hybrid electric vehicle. *Applied Energy*. 2021;283:116353.
- [10] ASHRAE. *Principle of heating ventilating and air conditioning*. S.I.: John Wiley & Sons, Inc.; 2017.
- [11] Vásconez-Núñez DC, González-Maciá J, Corberán JM, Payá J. Development and validation of a dynamic thermal model of a minibus using TRNSYS. *International Journal of Vehicle Design*. 2018;77(1/2):87-107.
- [12] Marcos D, Pino FJ, Bordons C, Guerra JJ. The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle. *Applied Thermal Engineering*. 2014;66(1–2):646–656.
- [13] Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, Dewitt DP. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, Inc.: United States of America; 2017.