



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y  
COMPENSACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES  
EN UNA CABINA DE AUTOMÓVIL**

**TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA MECATRÓNICA**

**PRESENTA:  
MARICARMEN GUILLÉN MANDUJANO**

**DIRECTORA DE TESIS:  
M. I. LIVIER BÁEZ RIVAS**

**MÉXICO, D.F.**

**2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A María Cristina.  
Quien siempre estuvo y estará,  
acompañándome en el camino.  
(Va por las dos, Inge.)*

# AGRADECIMIENTOS

A mis papás, Flor y Jorge, por darme el regalo más grande: la existencia. Por llenar cada momento de mi vida con su inconmensurable e incondicional amor, por todo su apoyo y su paciencia, por ser siempre la fuerte raíz que me sostiene, pero dejarme crecer a mi ritmo y manera. Papá, muchas gracias por enseñarme a soñar, a ser siempre auténtica, por tu noble corazón, por ser siempre ejemplo de lo que es ser una buena persona, por no dejar que me falte nunca lo fundamental, en todos los aspectos. Gracias por todas las pláticas, las enseñanzas, por tu compañía, por siempre involucrarme en tu mundo y tus sueños, por regalarme una afición. Mamá, gracias por absolutamente todo lo que día a día me enseñas, por todo tu amor, por tu infinita paciencia, por siempre ayudarme aunque “no lo necesite”. Gracias por enseñarme con tu vida el significado de la palabra amar. Gracias por seguir siendo mi maestra, por fomentar siempre en mí el gusto por saber, pensar y expresarme. Por tus abrazos, por ese lugar especial que sé que tengo en tu corazón. Por siempre desvelarte simplemente para acompañarme. Los amo infinitamente.

A mis hermanas, por ser las mejores amigas, maestras, cómplices y confidentes que la vida me pudo dar, por su amor, por siempre estar ahí para apoyarme, en las buenas y las malas.

Ginnie, gracias por todo tu cariño y tu cuidado, por enseñarme a no rendirme y a que si se quiere, se puede. Ale, gracias por TODO, por ser mi modelo a seguir en tantas cosas, por siempre salvarme en mis momentos de mayor urgencia, hasta para las cosas más simples. Pita, muchas gracias por tu motivación constante, por siempre recordarme lo valiosa que soy, por enseñarme lo que es la dedicación. Paty, gracias por tu cariño, por siempre querer hablar conmigo, por confiar en mí, por enseñarme cosas nuevas e inesperadas. Polis, gracias por enseñarme lo que es la perseverancia, por todos los momentos de debraye, por los chistes, por las fiestas y los cafés, por ser la mejor hermana gemela que pude pedir. Rotz, gracias por ser tú, por amarme y cuidarme siempre, por consentirme, por confiar en mí y escuchar todas mis tonterías, por todo lo que siempre hemos compartido. Todas ustedes son para mí una inspiración y las amo y admiro enormemente.

A mi familia, por todo su apoyo y su cariño. Tía Pim, gracias por todo tu apoyo, por sacarme de apuros sin dudar ni un momento, por tu infinita generosidad. Tía Ros y Tío Nazi, muchas gracias por darme ese espacio que necesitaba, por siempre recibirme con los brazos abiertos, por esos cafés y las pláticas de sobremesa, por siempre impulsarme a llegar más lejos. Tía Lu, muchas gracias por todo tu apoyo y tu cariño. Gracias Tío Ja, por las siempre interesantes y divertidas pláticas. Tía Pole, porque cuando todo inició me diste siempre tu apoyo y consejo, y sé que el día de hoy, sigues aquí, acompañándome. Majito, gracias por tu apoyo, por todos los “¿ya terminaste?”, por tu cariño y tu confianza.

A mis amigos de la Facultad, con quienes tuve el placer de compartir esta etapa de mi vida. Pana, gracias por cambiar mi mundo desde ese primer día de clases, gracias por ser mi amiga, mi maestra, mi hermana, y definitivamente la mejor compañera de equipo, por toda la confianza que has tenido en mí, por todo tu cariño. Gracias amiga, por siempre ver en mí lo mejor, por tu sinceridad y tu fortaleza. Roberto, gracias por tu amistad, por tu confianza, por tu amabilidad y tu apoyo, por motivarme siempre a ir más lejos, por todo lo que me has enseñado. Por ser el ejemplo de lo que significa tener ingenio. Paco, gracias por todo, todo lo que me apoyaste durante este proceso, por toda tu paciencia, tu tiempo, tus enseñanzas, por salvarme de los apuros mil y un veces, por recibirme en tu casa y responder a mis llamadas sin importar la hora. Gracias por tu confianza y por todos los momentos que hemos

compartido. A Rulo, Saúl, Adrián, Diego, Jacob, muchas gracias por todo lo que me han enseñado, por su confianza, su apoyo y amistad.

A mis amigas, Figue, Chochito, Kosh, Ana, Becky, Aranzu, Tichi, Maite, por estar siempre conmigo y animarme cuando más lo necesito. Gracias por las interminables pláticas, por todo lo que hemos compartido. Por su paciencia y su cariño. Gracias en especial a Becky, por mi acompañante (Tesina) y las siempre inspiradoras motivaciones durante el proceso de esta tesis.

A María Cristina, que siempre estuvo conmigo y que ha sido la principal motivación para seguir adelante en mis momentos de debilidad. Por cambiar mi vida y volverse una parte permanente de ella. Porque sé que desde donde sea que te encuentres, estás aquí, siempre apoyándome. Gracias por todo.

A mis amigos y amigas que han llegado a mi vida en diferentes momentos pero se han vuelto fundamentales. Marco, por todo tu apoyo y cariño, por tantos años de risas, de pláticas, de confianza, por todo lo que hemos vivido, por estar siempre ahí. Thitho, gracias por ser mi hermanita, mi maestra, por todas las pláticas, los chistes, por siempre escucharme y darme consejo, por todo tu cariño. Walter, muchas gracias por toda tu confianza, las miles de pláticas, por enseñarme que se puede ir siempre más alto, siempre más lejos. Gracias por todos esos momentos que hemos compartido. Gilbert, спасибо!! Gracias por siempre estar dándome ánimos, sin importar los kilómetros o las horas de diferencia, por todos los mensajes, por siempre alegrarme cuando lo necesitaba, gracias por ser parte de mi vida y acompañarme durante este proceso. Nathalie, por todo tu cariño incondicional y por apoyarme en los momentos más difíciles del proceso, por siempre tener algo lindo que decir, por tantas pláticas y toda tu confianza.

A la Maestra Livier Báez, por recibirme y aceptar ser mi asesora, por toda su paciencia, su sabiduría y la invaluable guía que fue para mí durante todo este proceso. Quiero agradecerle por nunca dejar de creer en mí y por motivarme siempre a ser mejor, por ser para mí un ejemplo a seguir no sólo en el aspecto profesional, sino como persona. Muchas gracias por todos sus comentarios, por sus consejos, por escucharme y siempre ayudarme a encontrar el camino de regreso a mi objetivo.

A la Doctora María Cristina León, por todas sus enseñanzas, por creer en mí, por contagiarme su pasión por la vida y las personas, por ampliar inmensamente mi perspectiva de la Ingeniería y ayudarme a encontrar mi camino en ella. Muchas gracias por brindarme esos espacios para platicar y por la confianza que depositó en mí.

A todos los profesores que participaron en mi formación y que contribuyeron de alguna manera a hacer de mí la persona que soy. Gracias al Dr. Adrián Espinosa, a la Dra. Pilar Corona, al Maestro Serafín y la Maestra Mayverena Jurado, por aceptar ser mis sinodales, por su tiempo y valiosas aportaciones para este proyecto.

Al Dr. Sergio Revah y al Maestro Juan Cabello, de la UAM-I, muchas gracias por su participación y por todo el tiempo, recursos y apoyo invertidos este proyecto.

Quiero agradecer a la UNAM y a la Facultad de Ingeniería por haberme proporcionado el espacio y las herramientas para fomentar mi crecimiento y formación profesional, por acogerme y ser mi hogar durante tantos años y por haberme dado la oportunidad de sentirme agradecida y orgullosa de formar parte de esta institución.





# RESUMEN

La falta de comodidad relacionada a los factores climáticos es frecuente en la cabina del automóvil, debido a que el vehículo es sometido simultáneamente a perturbaciones tanto externas como internas. Investigaciones basadas en análisis del confort térmico han proporcionado evidencias de que las variables ambientales afectan de forma directa al desempeño y la salud de los usuarios, especialmente los conductores, volviéndose un factor importante en la causa de accidentes viales.

Por ello, investigadores y fabricantes de la industria automotriz se han apoyado en el uso de simuladores de conducción para el desarrollo de soluciones que buscan garantizar la seguridad y la comodidad de los conductores. Sin embargo, en la actualidad no existe ningún simulador de conducción que incorpore un sistema enfocado en la modificación y/o control de las condiciones ambientales dentro de la cabina.

El trabajo presente plantea el desarrollo de un sistema conformado por sensores, actuadores, una interfaz gráfica de usuario y las interconexiones adecuadas entre ellos a través de un microcontrolador, con el fin de observar y ajustar tres variables ambientales que afectan al desempeño del conductor: la temperatura, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el aire del interior de la cabina. Se desarrolló y probó un modelo funcional para evaluar el uso de: enfriadores termoeléctricos tanto para el incremento como la disminución de la temperatura en el aire en la cabina, un humidificador ultrasónico para las variaciones en la humedad relativa y un sensor electroquímico para el monitoreo de la concentración de CO<sub>2</sub> como elementos del sistema propuesto.

Se efectuaron pruebas cuyos resultados sirvieron para documentar la capacidad de los elementos empleados para monitorear y generar cambios en las condiciones ambientales dentro de la cabina, así como para identificar algunas de las limitaciones de dichos elementos y el efecto que otras variables parecen tener sobre el comportamiento de los mismos, de manera que se cumplieron los alcances establecidos y se lograron sentar bases para la mejora y desarrollo futuro del sistema propuesto.

# ABSTRACT

In a car cabin, climatic factor-related discomfort is common, due to the frequent disturbances, both internal and external, that the vehicle is subjected to.

Thermal comfort research has provided evidence of how environmental variables directly affect the performance and health of car users, especially drivers, becoming a major factor in causing road accidents.

Therefore, researchers and manufacturers in the automotive industry have relied on driving simulators for developing solutions aimed to guarantee the safety and comfort of drivers. However, nowadays there is no driving simulator that incorporates a system focused on the modification and/or control of environmental conditions within the cabin.

The present work raises the development of a system conformed by sensors, actuators, and a graphical user interface, all properly interconnected through a microcontroller, in order to observe and adjust three environmental variables that affect the driver's performance: temperature, relative humidity and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration of in-cabin air. A functional model was developed and tested to evaluate the use of: thermoelectric coolers for both increasing and decreasing in-cabin air temperature, an ultrasonic humidifier for humidity variations, and an electrochemical sensor for CO<sub>2</sub> sensing as elements of the proposed system.

The obtained results proved the capability of the used elements to observe and generate changes on the environmental conditions inside the cabin, identified some of the limitations of such elements as well as the effects that other variables seem to have on their performance, meeting the objectives that were set and laying the groundwork for further improvements and development of the proposed system.

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>OBJETIVOS</b> .....	2
<b>ALCANCES</b> .....	2
<b>CAPÍTULO 1- MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES</b> .....	4
1.1 Justificación .....	4
1.2 Simuladores de conducción .....	6
1.3 Variables que afectan el desempeño del conductor .....	11
1.3.1 Temperatura y calor .....	14
1.3.2 Humedad relativa .....	17
1.3.3 Calidad del aire .....	19
1.3.4 Concentración de CO <sub>2</sub> .....	20
1.4 Estado del arte .....	23
<b>CAPÍTULO 2- DISEÑO CONCEPTUAL</b> .....	26
2.1 Identificación de la necesidad .....	26
2.2 Requerimientos y especificaciones del sistema .....	28
2.3 Análisis funcional del sistema .....	32
2.4 Generación del concepto .....	36
2.5 Selección del concepto .....	47
<b>CAPÍTULO 3- DISEÑO DE DETALLE</b> .....	50
3.1 Arquitectura del sistema .....	50
3.2 Implementación del sistema .....	51
<b>CAPÍTULO 4- PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	74
4.1 Instalación del sistema .....	74
4.2 Pruebas y resultados .....	78
<b>CAPÍTULO 5- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b> .....	120
<b>Referencias</b> .....	123
<b>APÉNDICES</b> .....	130

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>CAPÍTULO 1- MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES</b> .....	4
Tabla 1.1- Intervalo de confort, ASHRAE 55 .....	13
Tabla 1.2- Efectos a distintas concentraciones de CO <sub>2</sub> .....	21
<b>CAPÍTULO 2- DISEÑO CONCEPTUAL</b> .....	26
Tabla 2.1- Jerarquización de requerimientos .....	28
Tabla 2.2- Jerarquización de especificaciones objetivo .....	30
Tabla 2.3- Propuestas de solución para el Sistema de suministro de energía .....	36
Tabla 2.4- Propuestas de solución para el sistema de sensado de temperatura .....	36
Tabla 2.5- Propuestas de solución para el sistema de sensado de humedad relativa .....	37
Tabla 2.6- Propuestas de solución para el sistema de sensado de concentración de CO <sub>2</sub> .....	37
Tabla 2.7- Propuestas de solución para el sistema de procesamiento .....	38
Tabla 2.8- Propuestas de solución para el sistema de monitoreo y controles .....	38
Tabla 2.9- Propuestas de solución para el sistema de modificación de variables .....	39
Tabla 2.10- Tabla de combinación para la generación de conceptos .....	39
Tabla 2.11- Criterios de selección (ponderados) .....	47
<b>CAPÍTULO 3- DISEÑO DE DETALLE</b> .....	50
Tabla 3.1- Características del sensor RHT03 .....	52
Tabla 3.2- Características del sensor MG811 .....	54
Tabla 3.3- Características de la tarjeta Arduino UNO .....	59
Tabla 3.4- Características de la celda de Peltier TEC1-12706 .....	66
Tabla 3.5- Características del ventilador VN4-012P .....	66
Tabla 3.6- Características del deshumidificador CITIZEN™ CUN60 .....	69
<b>CAPÍTULO 4- PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	74
Tabla 4.1- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso I .....	81
Tabla 4.2- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso I .....	82
Tabla 4.3- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso I .....	83
Tabla 4.4- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso II .....	87

Tabla 4.5- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso II .....	88
Tabla 4.6- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso II .....	89
Tabla 4.7- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso III .....	93
Tabla 4.8- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso III .....	94
Tabla 4.9- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso III .....	95
Tabla 4.10- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso IV .....	99
Tabla 4.11- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso IV .....	100
Tabla 4.12- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso IV .....	101
Tabla 4.13- Variaciones de concentración de CO <sub>2</sub> en las pruebas del Caso A .....	106
Tabla 4.14- Variaciones de concentración de CO <sub>2</sub> en las pruebas del Caso B .....	109
Tabla 4.15- Variaciones de concentración de CO <sub>2</sub> en las pruebas del Caso C .....	112
Tabla 4.16- Variaciones de concentración de CO <sub>2</sub> en las pruebas del Caso D .....	115
Tabla 4.17- Comparativa de los requerimientos del sistema con el comportamiento de cada subsistema .....	118

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>CAPÍTULO 1- MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES</b> .....	4
Figura 1.1- Incremento poblacional y tasa de crecimiento poblacional en México .....	4
Figura 1.2- Automóviles registrados en circulación en México y ZMVM entre 1980 y 2010 .....	5
Figura 1.3- Simulador de conducción para capacitación de conductores, INANOCH .....	7
Figura 1.4- Simulador desarrollado por el Instituto de Trasportes de la Universidad de Michigan (UMTRI) .....	8
Figura 1.5- Simulador Daimler AG, desarrollado por el centro de Tecnología de Mercedes Benz ...	11
Figura 1.6- Gráfica de confort .....	13
Figura 1.7- Fuentes de calor que afectan a las condiciones en el interior de la cabina .....	15
Figura 1.8- Generación de CO <sub>2</sub> respecto al nivel de actividad física .....	22
Figura 1.9- Concentración de CO <sub>2</sub> respecto al número de pasajeros .....	22
<b>CAPÍTULO 2- DISEÑO CONCEPTUAL</b> .....	26
Figura 2.1- Matriz de relación requerimiento – métrica .....	29
Figura 2.2- Diagrama de caja negra del sistema .....	33
Figura 2.3- Diagrama de subsistemas .....	33
Figura 2.4- Diagrama de medios y funciones .....	35
Figura 2.5- Ilustración del concepto A .....	41
Figura 2.6- Ilustración del concepto B .....	42
Figura 2.7- Ilustración del concepto C .....	43
Figura 2.8- Ilustración del concepto D .....	44
Figura 2.9- Ilustración del concepto E .....	45
Figura 2.10- Ilustración del concepto F .....	46
Figura 2.11- Matriz de decisión (evaluación ponderada) .....	48
<b>CAPÍTULO 3- DISEÑO DE DETALLE</b> .....	50
Figura 3.1- Arquitectura del sistema .....	51
Figura 3.2- Diagrama de conexión del sensor RHT03 .....	52
Figura 3.3- Ilustración del protocolo de comunicación MaxDetect-1wire .....	53
Figura 3.4- Identificación del tipo de bit de datos .....	53
Figura 3.5- Curva de respuesta del sensor MG-811 .....	54

Figura 3.6- Esquema general del módulo SEN-000007 .....	55
Figura 3.7- Convertidor Buck y convertidor step-down del SEN-000007.....	56
Figura 3.8- Diagrama de conexión del sensor MG811 y circuito de amplificación y filtrado del SEN-000007 .....	57
Figura 3.9- Curvas de comportamiento del sensor de CO <sub>2</sub> con sus regresiones lineales .....	58
Figura 3.10- Curva de comportamiento promedio del sensor de CO <sub>2</sub> y su ajuste lineal .....	58
Figura 3.11- Diagrama del proceso “Establecer valores límite” .....	60
Figura 3.12- Diagrama del proceso “Control de temperatura” .....	60
Figura 3.13- Diagrama del proceso “Control de humedad relativa” .....	61
Figura 3.14- Diagrama del proceso “Control de concentración de CO <sub>2</sub> ” .....	61
Figura 3.15- Panel frontal de la interfaz gráfica de usuario .....	63
Figura 3.16- Panel de control de la interfaz gráfica de usuario .....	63
Figura 3.17- Configuración general del sistema termoelectrico para la modificación de la temperatura ambiental .....	65
Figura 3.18- Curvas de comportamiento de la TEC1-12706 .....	68
Figura 3.19- Valores de $\Delta T$ resultantes de la caracterización de la TEC1-12706 .....	68
Figura 3.20- Principio de funcionamiento del puente H .....	70
Figura 3.21- Diagrama electrónico del puente H para celdas de Peltier .....	71
Figura 3.22- Diagrama electrónico de la etapa de potencia de los ventiladores .....	71
Figura 3.23- Diagrama electrónico de activación del humidificador y de ventiladores .....	72
<b>CAPÍTULO 4- PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	<b>74</b>
Figura 4.1- Vehículo en espacio de pruebas (estacionamiento cubierto) .....	75
Figura 4.2- Localización de los módulos de temperatura y humedad dentro de la cabina .....	75
Figura 4.3- Localización de los sensores de temperatura y humedad relativa .....	77
Figura 4.4- Localización del sensor de concentración de CO <sub>2</sub> .....	77
Figura 4.5- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso I .....	81
Figura 4.6- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso I .....	82
Figura 4.7- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso I .....	83
Figura 4.8- Análisis de cambios de temperatura en las Pruebas del Caso I .....	85
Figura 4.9- Análisis de cambios de humedad relativa en las Pruebas del Caso I .....	86
Figura 4.10- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso II .....	88

Figura 4.11- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso II .....	89
Figura 4.12- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso II .....	90
Figura 4.13- Análisis de cambios de temperatura en las Pruebas del Caso II .....	91
Figura 4.14- Análisis de cambios de humedad relativa en las Pruebas del Caso II .....	92
Figura 4.15- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso III .....	94
Figura 4.16- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso III .....	95
Figura 4.17- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso III .....	96
Figura 4.18- Análisis de cambios de temperatura en las Pruebas del Caso III .....	97
Figura 4.19- Análisis de cambios de humedad relativa en las Pruebas del Caso III .....	98
Figura 4.20- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso IV .....	100
Figura 4.21- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso IV .....	101
Figura 4.22- Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso IV .....	102
Figura 4.23- Análisis de cambios de temperatura en las Pruebas del Caso IV .....	103
Figura 4.24- Análisis de cambios de humedad relativa en las Pruebas del Caso IV .....	104
Figura 4.25- Variaciones de concentración de CO <sub>2</sub> en las Pruebas del Caso A .....	107
Figura 4.26- Análisis de cambios de concentración de CO <sub>2</sub> en las Pruebas del Caso A .....	108
Figura 4.27- Variaciones de concentración de CO <sub>2</sub> en las Pruebas del Caso B .....	110
Figura 4.28- Análisis de cambios de concentración de CO <sub>2</sub> en las Pruebas del Caso B .....	111
Figura 4.29- Variaciones de concentración de CO <sub>2</sub> en las Pruebas del Caso C .....	113
Figura 4.30- Análisis de cambios de concentración de CO <sub>2</sub> en las Pruebas del Caso C .....	114
Figura 4.31- Variaciones de concentración de CO <sub>2</sub> en las Pruebas del Caso D .....	116
Figura 4.32- Análisis de cambios de concentración de CO <sub>2</sub> en las Pruebas del Caso D .....	118

# INTRODUCCIÓN

El propósito del presente trabajo es proponer un sistema para el monitoreo y control de tres variables ambientales dentro de la cabina de un automóvil, para su posterior aplicación en un simulador de conducción, con la finalidad de incorporar el efecto de dichas variables en la experiencia de conducción.

En la actualidad, el constante incremento en la cantidad de vehículos, principalmente en las regiones altamente pobladas como la Ciudad de México, conlleva como efecto la causa de diversas problemáticas, entre las que destacan la prolongación de las horas de manejo (debidas a los congestionamientos viales), el aumento en la emisión de contaminantes que causando daños en la salud de las personas así como daños en el ambiente, además de contribuir al incremento en la cantidad de accidentes viales.

Debido a lo anterior, las empresas dedicadas a la fabricación de automóviles dan prioridad a las investigaciones y proyectos enfocados en el diseño y optimización de sistemas que garanticen mayor comodidad y seguridad tanto para los pasajeros como de su entorno, ya sean sistemas de asistencia vial, sistemas de detección de estados inconvenientes para la conducción (presencia de alcohol, estrés, fatiga o sueño) [7, 14], sistemas de climatización inteligentes, que mejoran la comodidad y a su vez buscan una disminución en el consumo de combustible [23, 40, 44], entre otros. Dichas investigaciones han impulsado e incrementado el uso de sistemas de simulación de conducción.

En el presente escrito se expone de manera generalizada una revisión sobre los conceptos, las tecnologías y las aplicaciones actuales de los simuladores de conducción; las generalidades del sistema, sus requerimientos y especificaciones, el diagrama del sistema y subsistemas, así como una síntesis de la investigación realizada sobre las variables ambientales que intervienen en el proceso de conducción y que causan efectos adversos en el desempeño del conductor.

Con base en la información obtenida se seleccionaron como variables para el diseño del sistema la temperatura del aire, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el interior de la cabina de un automóvil. Posteriormente, se presenta una revisión sobre los posibles sensores, actuadores y demás elementos necesarios para la propuesta de diseño.

Una vez elegidos los elementos, se llevó a cabo la configuración y desarrollo de un modelo funcional, capaz de monitorear por medio de una interfaz gráfica las condiciones de temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>, a través de sensores incorporados a la cabina de un automóvil, logrando tanto la adquisición de datos como la activación de actuadores, para buscar la modificación de las condiciones hacia un intervalo deseado.

Dicho modelo representa una primera iteración del sistema propuesto para el control de variables en el simulador de conducción.

# OBJETIVO DEL PROYECTO

Proponer un sistema que permita monitorear, a través de una interfaz virtual, la humedad, temperatura y concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) dentro de una cabina de automóvil, así como la activación de actuadores para modificar dichas variables, con el fin de llevarlas a un intervalo de trabajo deseado.

## ALCANCES

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo del modelo funcional de una propuesta del sistema para monitoreo y modificación de las variables ambientales dentro de la cabina, sin llegar a la aplicación directa en un simulador de conducción, ni a la realización de pruebas que tengan que ver con los efectos de dichas variables sobre el conductor.

Con base en lo anterior, se identifican los siguientes alcances:

Diseñar un sistema capaz de monitorear y controlar variaciones de:

- Temperatura
- Humedad relativa
- Concentración de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

Desarrollar una interfaz gráfica en la plataforma LabVIEW® para el monitoreo de las variables anteriormente mostradas, así como la generación de un registro de resultados para cada prueba realizada.

Generar un modelo funcional para la ejecución de pruebas con el sistema propuesto, y probar dicho sistema en el ambiente final (cabina de automóvil).

Presentar los resultados obtenidos a través del modelo funcional.

# **CAPÍTULO 1**

# CAPÍTULO 1- MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

## 1.1 Justificación

Desde finales del Siglo XX y durante los años que han transcurrido dentro del siglo XIX, el incremento poblacional a nivel mundial ha ido en aumento de manera acelerada. Dicho incremento se puede apreciar en nuestro país, el cual se sitúa en el onceavo lugar entre los países más poblados del mundo, contando con más de 112 millones de habitantes [1], misma población que seguirá en aumento en los próximos años, como se observa en la Figura 1.1 [2]. A su vez, el total de la población se distribuye geográficamente a lo largo del país de manera irregular, existiendo fuertes concentraciones en áreas metropolitanas y ciudades [3], donde habita el 56.8% de la población nacional, siendo la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la zona metropolitana con mayor cantidad de habitantes, y la menor cantidad de extensión territorial.



Figura 1.1 – Incremento poblacional y tasa de crecimiento poblacional en México [3]

El incremento poblacional se relaciona directamente con la necesidad de satisfacer los servicios para los habitantes. Un ejemplo de dicha relación se puede observar en la Figura 1.2, que ilustra el aumento de vehículos con respecto al incremento poblacional, tanto a nivel nacional como en la ZMVM, en un periodo de treinta años.

Esta variación representa también el origen de diversos problemas, como el aumento de tráfico, el cual genera a su vez periodos de conducción más largos (debido a congestionamientos viales), el aumento en la cantidad de contaminantes producto de la combustión que causan daño directo tanto en la salud de los habitantes y en el ambiente, así como un incremento notable en la probabilidad de accidentes viales, ya que las poblaciones donde se registra mayor número de siniestros son aquellas donde existe mayor densidad vehicular [4].

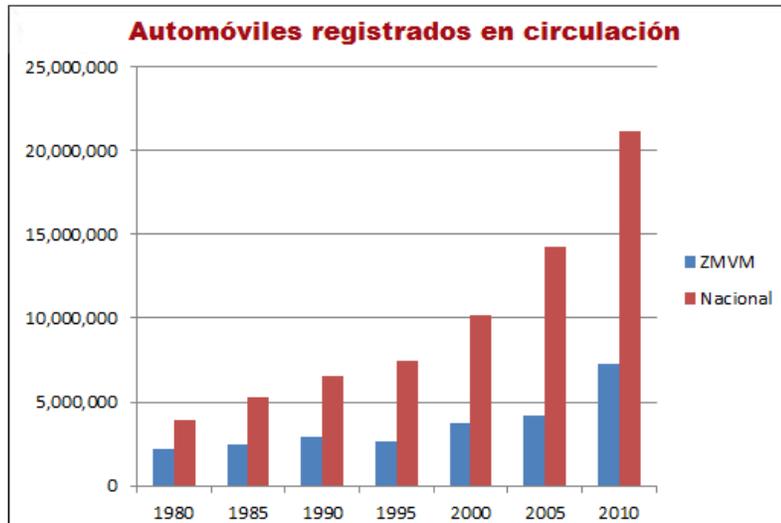


Figura 1.2 – Automóviles registrados en circulación en México y ZMVM entre 1980 y 2010. [2]

Los accidentes de tránsito, que representan la primera causa de muerte en la población de 5 a 34 años de edad y la segunda causa de orfandad en nuestro país, y que dejan a su vez heridos graves o con discapacidades, son originados por causas diferentes, entre las cuales el 4% se deben a condiciones del camino, 7% a fallas del vehículo, 9% a agentes naturales y el 80% de las veces factores humanos, que tienen que ver con el estado emocional y físico del conductor en un contexto de perturbaciones ambientales diversas, y son principalmente errores del conductor al no respetar señales de vialidad, límites de velocidad o reglas de tránsito, al conducir bajo efecto de alcohol u otras sustancias que empobrecen el juicio, al no contar con salud física adecuada (ceguera, sordera, etc.) o al conducir en estado de cansancio, fatiga, estrés o sueño [5].

Debido a lo anterior, el garantizar tanto la seguridad como la comodidad de los conductores durante los periodos de conducción se ha ido convirtiendo en una actividad de gran importancia, principalmente para los investigadores y fabricantes dentro de la industria automotriz.

En la actualidad existen distintas propuestas de solución en torno a la situación de accidentes causados por factores humanos. La más generalizada a nivel mundial se enfoca en la generación de conciencia y responsabilidad de los conductores, reforzando las iniciativas con sanciones, en algunos casos.

Otras soluciones propuestas involucran el uso de simuladores de conducción tanto para la capacitación y entrenamiento de conductores, especialmente aquellos dedicados al transporte de carga y de pasajeros, así como simuladores de conducción para la investigación enfocada en el desarrollo y validación de sistemas de asistencia para el conductor. Sobre esta misma línea, surge la necesidad de mejorar los simuladores de conducción [7].

## 1.2 Simuladores de conducción

### Generalidades de los simuladores

Se entiende como *sistema* una sección de la realidad, integrado por componentes que interactúan unos con otros de acuerdo a ciertas reglas y dentro de una frontera identificada, a través de la cual ingresan señales, materiales o energías, llamadas *entradas*, que tras ser procesadas generan respuestas, llamadas *salidas*, para un propósito de estudio determinado.

Con base en lo anterior el concepto de *simulación* se refiere al proceso de diseñar una representación o versión simplificada de un sistema, también llamado *modelo*, para llevar a cabo experimentos con él, a fin de estudiar el comportamiento del sistema real o evaluar distintas estrategias para su funcionamiento, cuando la experimentación con el sistema mismo resulta poco viable en cuestión de costos, seguridad o ética, cuando es imposible modelarlo matemáticamente o el modelo matemático es analíticamente imposible o demasiado complicado de resolver, cuando el sistema en cuestión se está diseñando y no existe en la realidad o cuando el tiempo de evolución del sistema real es muy rápido o muy lento y se requiere observar en un tiempo distinto del real [6].

Dependiendo de la interacción que haya entre las *variables* (propiedades, atributos o *parámetros* que poseen los elementos componentes del sistema), se pueden identificar tres modos de simulación:

- 1) **Análisis:** Las *variables de salida* (variables que traspasan la frontera del sistema o respuestas) del modelo equivalen a las variables de salida del sistema real. Este tipo de simulación busca estimar la respuesta del sistema real ante entradas específicas.
- 2) **Diseño:** Las salidas del modelo equivalen a los *parámetros* (atributos que se fijan durante el diseño del sistema) del sistema real. Se busca encontrar qué parámetros producirán las salidas deseadas para entradas específicas.
- 3) **Control:** Las variables de salida del modelo equivalen a las *variables de entrada* (variables que activan o detienen el funcionamiento del sistema). Se busca determinar el valor de las entradas que producirán las salidas deseadas, es decir, las condiciones de operación del sistema.

De acuerdo a la naturaleza del modelo, se pueden identificar cuatro tipos de simulación:

- a) **Simulación de identidad:** el modelo es una réplica exacta del sistema real.
- b) **Simulación de cuasi-identidad:** el modelo es una versión ligeramente simplificada del sistema real.
- c) **Simulación de laboratorio:** el modelo se desarrolla bajo condiciones controladas, puede ser un modelo de una sección del sistema o del sistema completo. Una subcategoría de la simulación de laboratorio, que es de interés para el presente proyecto, es la simulación hombre-máquina, en donde se observa la relación entre las personas (que también forman parte del modelo) y la máquina, y donde una computadora recolecta la información.
- d) **Simulación por computadora:** el modelo es completamente simbólico, implementado por lenguaje computacional, donde las personas no forman parte del modelo.

Con respecto a las aplicaciones, existen simuladores para procesos industriales, procesos de manufactura, diseño y análisis de procesos y sistemas públicos, construcción, educación, capacitación, sistemas de transporte, etc.

## Simuladores de conducción

Un *simulador de conducción*, como su nombre lo indica, es un modelo que representa, a menor o mayor escala, características, condiciones específicas o la experiencia misma, relacionadas con la conducción de un vehículo, siendo el objetivo general de estos simuladores el estudio del comportamiento del conductor, ya sea la interacción con el vehículo completo, la interacción con un sistema dentro del vehículo a través de interfaces humano-máquina (human-machine interfaces, HMI) o la interacción de sistema conductor-vehículo con el ambiente (camino o tráfico) [7].

De acuerdo con el uso que se les dé los simuladores de conducción pueden clasificarse en dos tipos principales:

- 1) Simuladores de conducción para entrenamiento o capacitación: donde el tema de mayor importancia es la seguridad. Suelen ser empleados como herramienta de entrenamiento donde el usuario se pondrá en contacto con el vehículo y aprenderá a operarlo en un ambiente controlado, por ejemplo, en escuelas de manejo o por empresas donde se busca capacitar a los empleados cuya función es el transporte ya sea de pasajeros o de mercancía.

Para llevar a cabo la capacitación integral de los conductores de vehículos se deben incluir tres aspectos importantes o “dominios” educacionales: el dominio cognoscitivo o mental (procesos puramente mentales); el dominio psicomotor (relaciones físicas y mentales durante una actividad); y el dominio afectivo (emociones que afectan al aprendizaje y desempeño durante la actividad). En un ambiente de simulación se pueden llevar a cabo pruebas que evalúen, ya sea de manera integral como individual, el aprendizaje y desempeño de los conductores dentro de los tres dominios anteriormente descritos. En la Figura 1.3 se puede observar el simulador de conducción para capacitación empleado por el Instituto Nacional de Capacitación Ocupacional de Chile (INANOCH), para el entrenamiento de conductores de camiones clase A5.



Figura 1.3 – Simulador de conducción para capacitación de conductores, INANOCH [8]

- 2) Simuladores de conducción para investigación: Se emplean para estudiar el comportamiento del conductor, en tareas más específicas dentro del proceso de conducción, y como función de uno o más variables, que pueden ser:
  - a) Variables centradas en el conductor: demografía del conductor (edad, género, experiencia), estado del conductor (fatiga, efecto de drogas o alcohol, estresores fisiológicos o psicológicos).
  - b) Variables del vehículo o sistemas interiores: incluyen la respuesta dinámica del vehículo la dirección, freno, aceleración, y otras características cualitativas del manejo del vehículo.

- c) Variables viales y ambientales: geometría del camino, signos y delimitación, terreno circundante y escenario (edificios, otros vehículos, tráfico) entre otros.

### Ventajas y desventajas de los simuladores de conducción

Los simuladores de conducción para investigación son empleados por las empresas automotrices, así como instituciones enfocadas en la investigación y desarrollo de sistemas de apoyo al conductor, debido a que reducen la brecha entre la simulación y análisis en laboratorio y las pruebas de campo realizadas con prototipos, sistemas y vehículos reales, teniendo a su vez un amplio rango de aplicaciones científicas, de ingeniería y de evaluación como son el diseño e investigación (Research and Design, R&D) de vehículos completos o de dispositivos y sistemas componentes del vehículo, estudios del comportamiento y factores del conductor, estudios de la interacción del conductor/vehículo con el entorno/camino, ingeniería y tecnología de simulación, desarrollo y evaluación de regulaciones y estándares vehiculares, encuestas de opinión y *marketing*, para reflejar la “voz del cliente”, entre otras. Un ejemplo de simulador de conducción para investigación se muestra en la Figura 1.4.

El uso de los simuladores de conducción para la investigación es cada vez más frecuente, pues por su versatilidad permiten ser configurados fácil y económicamente para simular una gran variedad de problemas de investigación, evaluando el desempeño del humano dentro de un sistema delimitado, con diversos escenarios y condiciones determinadas, susceptibles a modificaciones sistemáticas y repetibles, dando posibilidad a pruebas comparativas (manteniendo los valores de algunas variables constantes y variando otros).



Figura 1.4- Simulador desarrollado por el Instituto de Investigación de Transportes de la Universidad de Michigan (UMTRI) [9]

Asimismo, en un simulador de conducción se puede observar el comportamiento del conductor bajo condiciones demandantes o en situaciones críticas (choque, descarrilamiento, pérdida de control del vehículo), así como la influencia del alcohol, droga, fatiga, desórdenes médicos, en un ambiente intrínsecamente seguro, donde no se pone en peligro ni al conductor ni a otros usuarios, lo cual no es posible de realizar en las pruebas de campo [10, 11, 12, 13].

También facilita el registro de datos e información, no sólo por permitir mayor acceso y uso de equipos de monitoreo, sino que muchas variables potencialmente dependientes pueden ser determinadas como parámetros dentro del modelo de simulación.

Otro beneficio en cuanto al uso de los simuladores de conducción es que permiten el planteamiento de soluciones en el diseño de sistemas de apoyo vial, como sistemas de asistencia avanzada para el conductor (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS), así como el análisis u observación del comportamiento de alguna parte o sistema del vehículo que deba ser probado bajo condiciones exactamente iguales, y el planteamiento de distintas soluciones antes de construir prototipos, representando también un ahorro en costos de ingeniería, manufactura y tiempo [10, 14].

Si bien existen muchas ventajas en el uso de simuladores de conducción, se presentan también varias limitaciones dignas de consideración, entre las que destaca la dificultad de diseñar un simulador con un alto nivel de realismo, debido a que las condiciones de tráfico real, así como las condiciones del entorno, son casi siempre impredecibles, y mientras más compleja sea la situación a observar, se debe buscar mayor realismo, con el fin de no interpretar de manera incorrecta los resultados. Esto a su vez da paso al problema de la validación de los resultados obtenidos, pues en muchos casos es necesario conocer o realizar pruebas de campo correspondientes para tener una referencia de hasta qué punto el comportamiento registrado en el simulador se asemeja a la realidad.

A su vez, la falta de correspondencia de las reacciones de los sistemas que integran el simulador con las leyes físicas que rigen en la realidad, como la dinámica del auto, y los tiempos de respuesta en el movimiento, la falta de correspondencia entre sensaciones físicas y de procesamiento de imágenes y/o sonidos, pueden ser causantes del padecimiento conocido como “enfermedad o mal de movimiento” o “mal de simulación”, que es un desfase en la percepción visual, vestibular y propioceptiva, cuyos síntomas incluyen mareo, vómito, falta de coordinación de movimientos, entre otros. Este padecimiento no puede ser propiamente pronosticado o diagnosticado y es raramente observado en la vida real, además de que varía entre los participantes, de manera que es necesario prevenir toda posible causa.

Las limitaciones anteriormente mencionadas guardan una estrecha relación con dos conceptos de suma importancia en los ambientes de simulación y realidad virtual, que son la *inmersión* y la *presencia* [16, 17]. La *inmersión* se refiere al nivel objetivo de fidelidad sensorial que provee el entorno de simulación y que depende solamente de los elementos y tecnología empleada en el sistema. Es una variable medible, objetiva y comparable, es decir que puede decir que un simulador posee mayor nivel de inmersión que otro. Por otro lado, la *presencia* se identifica como la sensación del participante de “estar ahí”. Si bien está fuertemente ligada al grado de realismo proporcionado por el nivel de inmersión del simulador, es una respuesta psicológica subjetiva del usuario ante el entorno virtual, individual y totalmente dependiente del contexto de cada usuario.

En algunas aplicaciones de la realidad virtual y la simulación, “escuchar y ver” no es suficiente, ya que para lograr un ambiente inmersivo ideal, se deben involucrar todos los sentidos del participante, a través de los demás canales perceptuales humanos, incluyendo las sensaciones hápticas, es decir, el conjunto de percepciones táctiles (a través de la piel) y cinestésicas o dinámicas (información de movimiento). La conducción vehicular, por ejemplo, es considerada a menudo como una tarea dominada por la información visual, sin embargo se ha establecido que otra información sensorial, como la vestibular y propioceptiva, contribuye a la percepción y control del movimiento [12].

Dentro de las respuestas hápticas principales que se deben considerar en los ambientes de simulación se encuentra la respuesta de fuerza, la respuesta de movimiento y la respuesta de temperatura [15].

Para lograr involucrar los diferentes canales de percepción, los simuladores pueden contar con distintos niveles de complejidad, logrando un mejor nivel de inmersión a través de la inclusión de uno o más de los siguientes elementos [18]:

- Sistema visual
- Sistema de audio
- Sistema de movimiento (desplazamiento y sensación de relieve)
- Sistema de modelación de respuesta dinámica del vehículo a las acciones del conductor e interacción con el camino (sistema de vibración)
- Sistema de interfaz con el usuario (actuación y reproducción de controles)
- Sistema de comunicación entre computadoras y controladores (sistema informático)

Dependiendo de cuantos de los sistemas anteriores se incluyan en el simulador, se puede considerar a su vez otra clasificación, tomando en cuenta la relación del nivel de sofisticación con el costo inicial para el desarrollo de dicho simulador, identificándose en tres categorías [11]:

- a) Simuladores de bajo costo: se nombran así usualmente por su baja calidad en la transmisión de imágenes, además de que las investigaciones que se desarrollan en ellos son limitadas a procesos que requieren de poco nivel de inmersión. Son empleados usualmente en proyectos de investigación y de estudiantes, para los que se cuenta con bajo presupuesto. Proveen un nivel de inmersión razonable, a través de la inclusión del sistema visual, sistema de audio y sistema informático que proveen las computadoras actuales. Pueden o no contar con elementos de interacción con el vehículo (controles, pedales, etc.) Entre este tipo de simulador se encuentran el simulador desarrollado por el Instituto de Investigación del Transporte en la Universidad de Michigan (UMTRI), mostrado en la Figura 1.4, y el prototipo de Autosim.
- b) Simuladores de costo medio: incluyen un sistema de audio y sistema visual con técnica avanzada y procesamiento en tiempo real, con mayor calidad y grandes pantallas para obtener un campo visual mucho mayor. Generalmente incluyen una cabina de vehículo completa, con todos los controles normales, así como la posibilidad de incorporar o no algún sistema de movimiento o vibraciones para simular las sensaciones dinámicas básicas en la cabina del automóvil. En esta categoría se encuentran el simulador desarrollado por la DRI (Dynamic Research Incorporated) y el simulador de la Universidad de LEEDS.
- c) Simuladores de costo alto: son considerados los simuladores más avanzados, ya que incluyen todos los sistemas mencionados anteriormente, contando con campo visual de hasta 360°, sistema de audio avanzado que involucra tanto sonidos del vehículo como ambientales. Poseen bases móviles con extensa capacidad, usualmente bases hexapódicas para la simulación de movimientos, y bandas para desplazamiento y aceleración, dotando al simulador de seis o más grados de libertad. Algunos ejemplos de estos simuladores son el Daimler AG, que se muestra en la Figura 1.5, desarrollado para el Centro de Tecnología de la compañía automotriz Mercedes Benz, el National Advanced Driving Simulator (NADS) desarrollado por la Universidad de Iowa y el simulador empleado por el Instituto de Investigación en Transporte y Caminos, VTI, en Suecia.



Figura 1.5 - Simulador Daimler AG, desarrollado por el Centro de Tecnología de Mercedes Benz [19]

Cuando se estudia el comportamiento del conductor como función del camino, las condiciones de visibilidad, las características del vehículo o del tráfico, se requiere de una simulación con la más absoluta fidelidad posible. Si bien los simuladores de conducción cuentan cada vez más con sistemas sofisticados y de alta tecnología, es necesario analizar cuidadosamente el conjunto completo de variables percibidas por el conductor, entre las cuales se encuentran las variables ambientales.

Los fenómenos térmicos deben ser incluidos en los procesos interactivos, como la simulación de conducción, para la plena participación de los sentidos, ya que enfatiza los efectos de presencia pues los fenómenos relacionados con la temperatura forman parte de la vida cotidiana [15].

### 1.3 Variables ambientales que afectan el desempeño del conductor

De acuerdo a la American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, ASHRAE, se denomina *confort* o *comodidad térmica* al estado mental que expresa satisfacción con las condiciones del ambiente circundante [20].

La cabina del automóvil es un lugar donde la falta de comodidad relacionada a los factores climáticos es frecuente, ya que el vehículo es sometido simultáneamente a perturbaciones, más o menos fluctuantes, como la temperatura, tanto del exterior como de las superficies internas, temperatura del motor, radiación solar (intensidad y ángulos de incidencia), humedad, velocidad del vehículo, perfiles de velocidad del aire dados por la geometría interior, número de pasajeros, entre otras, que motivan al conductor buscar constantemente las condiciones que encuentra convenientes o con las que no siente incomodidad [21].

Las características climáticas dentro de la cabina del automóvil son un factor importante en la causa de accidentes viales, al afectar directamente en el desempeño y salud del conductor, contribuyendo al incremento o reducción de estrés generado durante la conducción, así como contribuir al fenómeno de empañamiento de las ventanas, teniendo un efecto directo en la experiencia de conducción. Algunos estudios mostraron como el desempeño del conductor se deteriora en ambientes con condiciones climáticas extremas, al disminuir un 16% en clima frío y 13% en clima caliente, mientras que el desempeño del conductor mejora notablemente en un ambiente termoneutral, es decir, donde el usuario no siente ni frío ni calor [22].

Si bien la temperatura es una variable de gran importancia para definir el confort en términos de las condiciones climáticas, el ambiente dentro de la cabina es complejo y no se puede describir únicamente a través de ella. Se han determinado seis factores, de los cuales cuatro son variables ambientales y dos son parámetros personales e independientes, que afectan a la percepción de confort térmico [20]:

- 1) Temperatura del aire: se refiere a la temperatura que rodea al ocupante de un espacio. Determina el flujo de calor neto entre el cuerpo humano y su entorno.
- 2) Humedad relativa del aire: se refiere a la relación entre la cantidad real de vapor de agua en el aire y el valor máximo de vapor de agua que el aire puede mantener a cierta temperatura.
- 3) Temperatura radiante media: es la relación del intercambio neto de energía radiante entre dos cuerpos en proporción a la diferencia de temperatura entre ellos y su habilidad de absorber o emitir calor.
- 4) Velocidad relativa del aire: hace referencia al movimiento del aire que transmite calor por convección, manipulando transferencias de calor sin modificar la temperatura del aire.
- 5) Resistencia térmica de la ropa: se refiere al aislamiento o resistencia entre el cuerpo y el ambiente, dada por las características de la ropa que viste el ocupante.
- 6) Nivel de actividad: referente a la tasa de metabolismo o trabajo que controla el calor generado dentro del cuerpo humano mientras se lleva a cabo una actividad física.

Se han realizado varios estudios tanto para el análisis del confort térmico como para la observación del efecto que tienen sobre los pasajeros en un automóvil algunas de las variables que afectan a su determinación [20, 21, 23]. Los resultados obtenidos en dichas investigaciones han demostrado que a pesar de que las personas son más sensibles a la variación de temperatura, el controlar la humedad relativa se puede alcanzar la sensación de confort térmico en menos tiempo. Así mismo, se ha concluido que si bien la velocidad del aire es un factor importante en la determinación del confort térmico, sus efectos pueden ser reemplazados con la variación de humedad.

Lo anterior puede ser entendido mejor a través del concepto de *temperatura efectiva*, que es una medida de confort que relaciona los efectos de la temperatura, la humedad relativa y la velocidad (movimiento) del aire, en un mismo indicador. La temperatura efectiva establece una relación en la cual, bajo una misma condición de velocidad del aire, existen distintas combinaciones de temperatura y humedad relativa que generan la misma sensación de confort. Dicho en otras palabras, dos ambientes que tienen la misma temperatura efectiva, provocan la misma respuesta térmica, aun teniendo temperaturas y humedades distintas, mientras tengan la misma velocidad del aire [24].

Para poder determinar un ambiente de confort térmico, se debe establecer un rango de valores para las variables anteriormente mencionadas, en donde la mayoría de las personas que se encuentran dentro de cierto entorno, sientan satisfacción con las condiciones del ambiente.

La mayoría de las personas sienten comodidad entre condiciones de 21 a 27.5° C, 30 a 65% de humedad y velocidades del aire con un valor promedio de 5 m/s [25]. Sin embargo, existen variaciones en cuanto a las condiciones preferidas con respecto a las condiciones generales del clima exterior. Por ejemplo, la ASHRAE recomienda un rango de temperatura de confort entre los 20 y los 23 °C durante el verano, mientras que los valores recomendados para el invierno son de 23-26 °C, y de manera más generalizada una zona de confort con valores entre 22-24°C para la temperatura y entre 40 y 60% para la humedad relativa.

Para la solución de problemas de diseño que requieren establecer rangos de valores de confort térmico, existe una herramienta muy útil, generada a través de la norma ASHRAE 55, conocida como la tabla o gráfica de confort, mostrada en la Figura 1.6.

Actualmente las empresas que diseñan y fabrican sistemas de climatización y aire acondicionado se basan en los intervalos recomendados por la ASHRAE, los cuales se muestran en la Tabla 1.1 [26].

Parámetro	Mín.	Máx.	Promedio
Temperatura [°C]	20	25.6	22.5
Humedad [%]	40	60	50
Velocidad del aire [m/s]	1	5	2.5

Tabla 1.1 – Intervalo de confort, ASHRAE 55 [26]

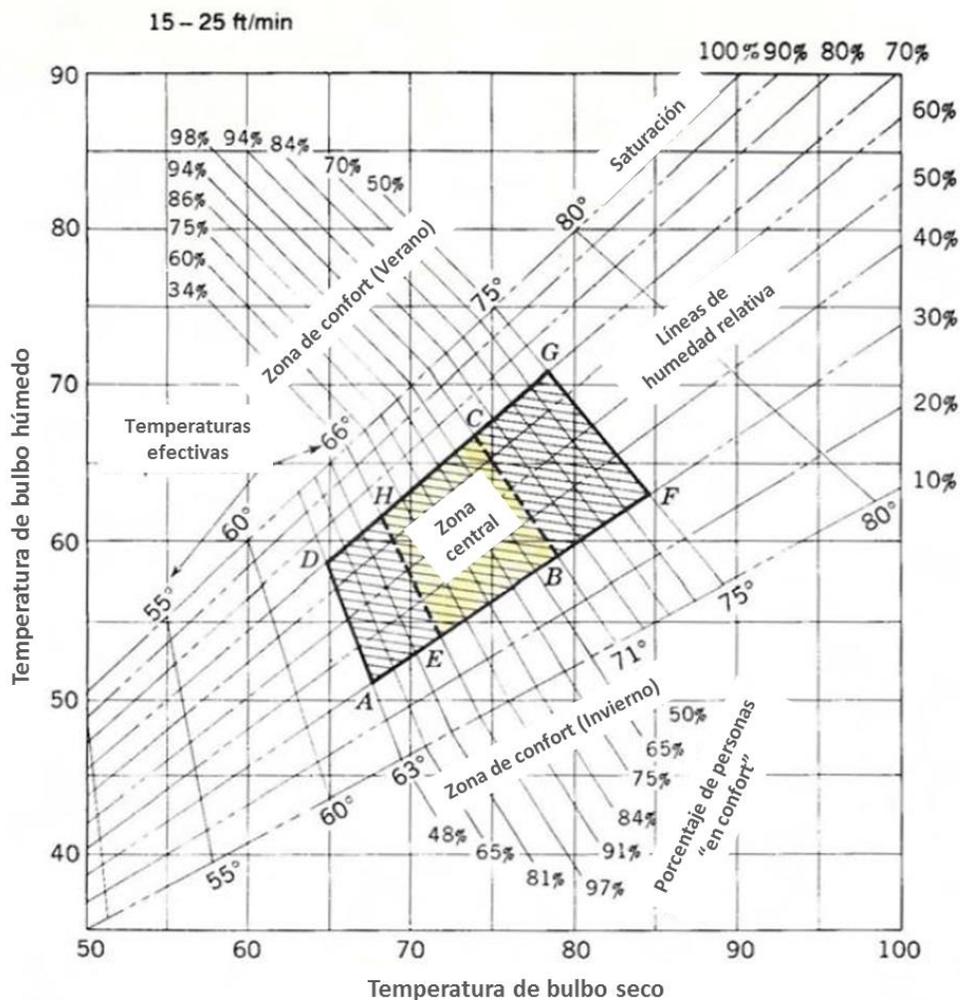


Figura 1.6 – Gráfica de confort [27]

### 1.3.1 Temperatura y calor

La *temperatura* se define como la propiedad de la materia que refleja la medida de la energía cinética (energía generada por el movimiento) de las partículas contenidas en un objeto, cuerpo o sistema [24].

El *calor* o *energía térmica*, es una forma de energía que se transfiere entre las partículas en una sustancia o sistema. Al tratarse de un tipo de energía, se mide en Joules [J], BTU (British Thermal Unit) o Calorías [Cal].

Si bien son conceptos que se vinculan, es necesario recordar que la temperatura es diferente del calor. La temperatura es una medida de la energía interna del sistema, mientras que el calor es una medida de la transferencia de energía de un cuerpo o sistema a otro.

En otras palabras, la transferencia de calor es un proceso a través de cual la energía interna, o temperatura, de una sustancia se transfiere a otra sustancia, de manera que mientras más grande es la cantidad de calor absorbido por un material, más rápido es el movimiento de los átomos dentro del material y, por lo tanto, más grande es el incremento en la temperatura.

Todos los cuerpos que se encuentran inmersos en un ambiente están sujetos a las leyes de la termodinámica, (rama de la física que estudia las relaciones entre el calor y otras propiedades como presión, temperatura, densidad, etc.), las cuales explican la transferencia de calor como la colisión de las partículas de una sustancia con las de otra, siendo siempre la sustancia con mayor energía quien “pierda” o “ceda” energía interna, mientras que la sustancia con menor energía “gana” energía interna [28].

A la percepción en el cambio de la temperatura de ambas sustancias generado por este intercambio de calor es a lo que llamamos *enfriamiento* (en el caso de la pérdida de energía) y *calentamiento* (cuando se gana energía interna). Cuando dos cuerpos, sustancias o sistemas se encuentran en contacto térmico, pero no existe transferencia de calor, se dice que se encuentran en equilibrio térmico, es decir, ambos poseen la misma temperatura.

Dependiendo de las características de los sistemas, o del medio de conducción, se pueden identificar tres formas de transferencia de calor:

- 1) Transferencia de calor por *conducción*: el calor fluye a través de un medio sólido debido a la combinación de la vibración de las moléculas y la energía de transporte de electrones libres. La velocidad de conducción de calor depende de la forma, el espesor, el material y la diferencia de temperatura a través del medio.
- 2) Transferencia de calor por *convección*: toma lugar entre una superficie sólida y un fluido (líquido o gas) circundante, o entre dos líquidos o gases con un gradiente de temperatura, debido a la combinación de dos tipos de movimiento: la difusión o movimiento aleatorio de moléculas y el movimiento del fluido en masa.

Cuando el movimiento de las partículas del líquido o gas es causado por diferencia de temperaturas de las sustancias en contacto, se dice que se trata de *convección natural* o *libre*, mientras que si el movimiento es forzado por un ventilador o bomba, se trata de *convección forzada*, en donde mientras mayor es la velocidad de desplazamiento, mayor la transferencia de calor.

- 3) Transferencia de calor por *radiación*: El calor es transferido por medio de ondas electromagnéticas producto de la configuración electrónica de los átomos y moléculas. Se puede dar aún en el vacío, es decir, sin necesitar un medio material entre el cuerpo que desprende la energía y el que lo recibe. La radiación térmica a la que se somete un cuerpo puede ser absorbida por la superficie del mismo, reflejada o, si el material es transparente, transmitida en cierta parte a través del cuerpo. Cualquier sustancia con una temperatura mayor al cero absoluto (0 K, -273°C) emite radiación térmica.

Los fenómenos de temperatura que nos rodean en la vida cotidiana involucran los tres tipos de transferencia de calor.

En el caso de los vehículos, por ejemplo, las condiciones de la temperatura interior están sometidas constantemente a cambios, debido a que existen diversas fuentes de calor, tanto externas como internas, a través de las cuales se intercambia energía de manera transitoria.

Las principales fuentes de calor que afectan a un automóvil, que se muestran de manera general en la Figura 1.7, son:

- La temperatura del aire, temperatura ambiental, o temperatura de bulbo seco. Es la temperatura del aire circundante, que no considera la humedad o la velocidad del aire.
- Radiación solar
- Calor del motor. Producto de la combustión, fricción de partes mecánicas y componentes electrónicos del motor, que se transfiere al interior de la cabina cuando el auto está en funcionamiento.
- Calor del camino. Es el calor reflejado por el pavimento o camino.
- Calor del escape. Como su nombre lo indica, es el calor proveniente de los gases producidos en la combustión y que al recorrer el camino al escape, transfieren energía al interior de la cabina por la parte inferior.
- Radiación de calor corporal de los pasajeros.
- Radiación de calor de las superficies internas de la cabina.

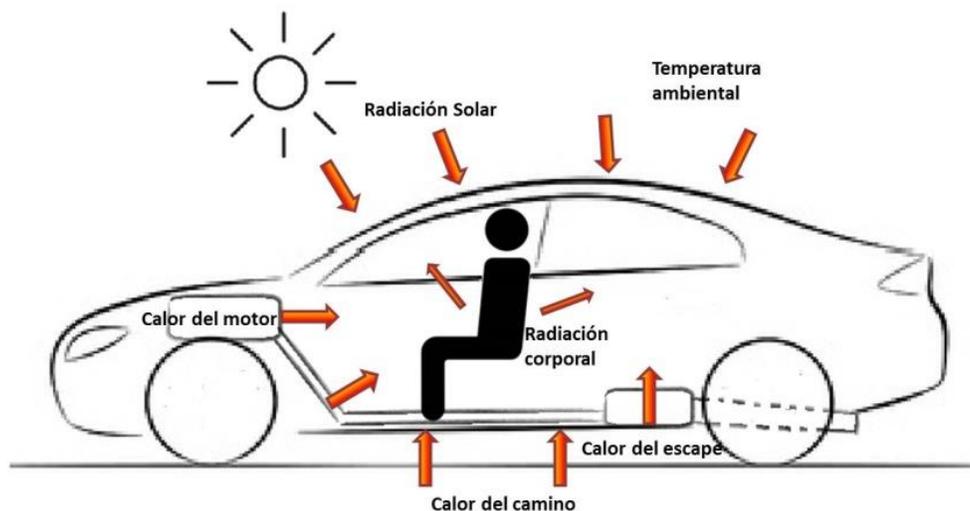


Figura 1.7 – Fuentes de calor que afectan a las condiciones en el interior de la cabina [29]

## Formas de medición de temperatura

Para diseñar un instrumento que mida la temperatura se debe considerar una cualidad de la materia que varíe de manera importante con la agitación de sus partículas, de forma que sea fácil de medir dicha variación con respecto a los cambios en la temperatura (agitación del cuerpo). Teniendo en cuenta los siguientes tres términos [24, 30]:

1. Exactitud: capacidad de un instrumento para registrar el valor verdadero de una cantidad medida.
2. Precisión: capacidad del instrumento para generar la misma lectura repetidamente bajo condiciones iguales.
3. Sensibilidad: capacidad para indicar el cambio en la cantidad medida.

Existen muchos tipos de instrumentos para medir la temperatura, como los que se describen a continuación:

➤ *Termómetros de líquido*: consisten en recipiente capilar de vidrio sellado, que contiene un líquido de rápida dilatación ante los incrementos de temperatura, usualmente mercurio o alcohol. Este tipo de instrumentos se empleaban anteriormente para la medición de temperatura, en la actualidad han sido reemplazados por sistemas remotos de medición de temperatura.

➤ *Termorresistencias o detectores resistivos de temperatura (Resistance temperature detectors, RTD)*: emplean una resistencia fabricada con óxidos metálicos, cuya resistividad eléctrica cambia con el aumento en la temperatura. Tienen la ventaja de ser precisos y lineales, pero la desventaja de ser usualmente elevados en cuanto a su costo, a que la variación en la resistencia es reducido y a que se calientan.

➤ *Termopares*: consisten en la unión de dos alambres de material distinto unidos en un extremo mediante soldadura, normalmente encapsulados. Funcionan con base en el efecto Seebeck, que establece que al aplicar calor en una unión de metales distintos se produce un voltaje de valor muy pequeño. No son lineales.

➤ *Termistores (Thermally sensitive resistors)*: formados por un semiconductor de resistencia eléctrica variable ante los cambios de temperatura, diferencia de los RTD, que usan un material conductor. Son más sensibles a los cambios de temperatura y se pueden usar para medir cambios de temperatura en gases, líquidos y sólidos, pero no son estables ni exactos.

➤ *Circuitos integrados lineales*: componentes electrónicos encapsulados que contienen circuitos integrados de metales semiconductores, con contactos metálicos para su conexión. Admiten un intervalo de señales de infinitos valores válidos, cuyos valores de salida son proporcionales al de la temperatura. Existen circuitos integrados tanto analógicos (valores continuos) como digitales (valores discretos basados en principios booleanos).

### 1.3.2 Humedad Relativa

El aire, a cualquier temperatura, puede contener cierta capacidad de vapor de agua en él. A dicha cantidad de vapor de agua contenido se le llama *humedad*. Cuando se alcanza el máximo valor de humedad, se dice que el aire está saturado.

La *humedad relativa*, es la relación de la fracción molar de vapor de agua de una muestra de aire húmedo con respecto a la fracción molar del vapor de agua de una muestra de aire húmedo saturado a la misma temperatura y presión, es decir, la cantidad de vapor en el aire relativa a la cantidad de vapor de agua que podría estar presente en el aire si, a la misma presión y temperatura, estuviera saturado. Al tratarse de una proporción, no tiene unidades de medida, y se expresa en porcentaje [31].

Para poder medir cuánto vapor de agua hay en el aire se emplea la *temperatura de punto de rocío*, que es la temperatura a la cual debe enfriarse el aire para que se alcance la saturación, es decir, la temperatura a la cual se debe encontrar el aire para que comience la condensación del vapor de agua. Si la temperatura de punto de rocío está cercana a la temperatura ambiental, quiere decir que el aire está próximo a la saturación, por lo tanto está muy húmedo. Por el contrario, si la temperatura de punto de rocío es baja, quiere decir que el aire está seco y puede contener más agua.

La humedad del aire está sujeta a cambios constantes, dependientes de la temperatura y presión, además de que procesos naturales como la evaporación de los cuerpos de agua (ríos, mares, lagos, etc.) por la radiación solar contribuye a la acumulación de vapor de agua en el aire.

Asimismo, los seres humanos contribuimos a la producción de vapor de agua que se incorpora al aire, principalmente a través de dos procesos biológicos que son la respiración y la transpiración o sudoración. El cuerpo siempre busca mantener nivelada la temperatura, tanto interior como en la piel. La sudoración es un proceso que el cuerpo usa para enfriarse, a través de lo que se conoce como *enfriamiento por evaporación*, que consiste en la reducción de la temperatura resultante de la evaporación de un líquido, en este caso agua, eliminando el calor latente de la superficie donde se lleva a cabo la evaporación.

Debido a que el aire sólo puede contener cierta cantidad de vapor de agua, cuando la humedad relativa es muy elevada, significa que la capacidad para contener agua es reducida. Si no hay lugar al cual pueda incorporarse el agua evaporada durante la sudoración, ésta permanece en la piel, evitando que se lleve a cabo el enfriamiento por evaporación y causando por lo tanto que la sensación de calor sea más intensa. Esto a su vez reduce la sensación de comodidad.

Durante el proceso de respiración, el aire que ingresa al cuerpo (aire ambiental), contiene aproximadamente 20.8% de oxígeno, 78.6% de nitrógeno, 0.04% de dióxido de carbono y un 0.56% de vapor de agua. Tras realizarse los intercambios de gases, la composición del aire que sale del cuerpo contiene la misma proporción de nitrógeno, mientras que la concentración de oxígeno se reduce a 15.6%, y las concentraciones de dióxido de carbono y vapor de agua aumentan a 4% y 1.8%, respectivamente. El vapor de agua producido que se muestra en este incremento es resultado del proceso termorregulador del cuerpo.

## Formas de medición de humedad relativa

Al igual que en la medición de temperatura, cuando se quiere medir la humedad, se busca aquel dispositivo que provea mayor grado de exactitud, precisión y sensibilidad en la lectura.

En la actualidad existe una gran variedad de instrumentos que son utilizados para la medición de humedad, también conocidos como higrómetros, los cuales se pueden clasificar principalmente en dos tipos:

➤ *Higrómetros mecánicos:* trabajan con el principio de expansión de los materiales higroscópicos, como pelo de animal o de humano, polímeros plásticos (nylon), fibras naturales o madera, debida a la absorción de vapor de agua del aire ambiental. Al conectar estos materiales con uniones mecánicas o a transductores eléctricos, se pueden calibrar para producir mediciones directas de la humedad relativa en el aire. Entre las ventajas en el uso de este tipo de medidores es que indican directamente la humedad relativa, son fáciles de reproducir y relativamente baratos y aunque su error de precisión es de aproximadamente 3%, este valor no es confiable tras un periodo largo de trabajo, además de que carecen de exactitud en humedades relativas extremadamente altas o bajas. Además, resultan ser un poco robustos y no son de gran utilidad en aplicaciones industriales.

➤ *Higrómetros electrónicos:* Basados en el uso de elementos electrónicos, obtienen directamente la relación entre la humedad relativa a través de señales eléctricas. Se identifican principalmente tres tipos de higrómetros electrónicos:

- *Higrómetros resistivos tipo Dunmore:* Dependen de la resistencia entre dos electrodos montados en un material higroscópico. A cierta temperatura, la resistencia eléctrica disminuye con el incremento de humedad. Debido al acentuado cambio de resistencia con respecto a la humedad, cada sensor Dunmore puede cubrir únicamente cierto rango de humedad relativa, siendo necesarios varios sensores para lograr una lectura entre 1 y 100%.
- *Higrómetros resistivos de intercambio iónico:* Compuestos por electrodos montados en una placa base y cubiertos por una sal sensible a la humedad embebida en una resina (polímero), entrelazando los electrodos. La resina se cubre con una capa protectora permeable al vapor de agua. La humedad se mide por medio del cambio en la resistencia entre los electrodos, cuando la sal que contenida en el material sensible a la humedad se vuelve conductora de iones debido a la presencia de agua en el aire ambiental, se forman iones móviles en el polímero, cuya concentración aumenta o disminuye de manera proporcional a la concentración de humedad, de manera que cuando los electrodos son excitados por una corriente, la alteración en la impedancia del sensor se mide y es usada para calcular el porcentaje de humedad relativa.
- *Higrómetros capacitivos:* consisten de una lámina de plástico, recubierta en ambos lados por una película de oro muy delgada, a manera de electrodos, formando un capacitor que se monta dentro de una cápsula. El vapor de agua penetra en la capa de oro, de manera que la cantidad de moléculas de agua absorbidas por la lámina de plástico determinan la capacitancia y por lo tanto la resistencia entre los electrodos. Este tipo de sensor es especialmente apropiado para ambientes de alta temperatura porque el polímero dieléctrico puede soportar altas temperaturas. Son también apropiados para aplicaciones que requieran un alto grado de sensibilidad a niveles bajos de humedad, donde proveen una respuesta relativamente rápida, sin embargo, en valores de humedad superiores al 85 %HR tienden a saturarse y se transforman en no lineales.

### 1.3.3 Calidad del aire

El concepto de *calidad del aire* se refiere al estado del aire que nos rodea. Sirve como un indicador de cuánto aire está libre de contaminación, o visto de otra manera, cuál es el nivel de contaminación del aire, para determinar si es o no respirable, considerando si la concentración de contaminantes no alcanza niveles tales que tenga efectos negativos sobre la salud de las personas (enfermedades cardiovasculares, pulmonares o respiratorias) o sobre el ambiente [32].

A nivel general, la calidad del aire es afectada por contaminantes de origen tanto natural como causados por el hombre, entre los que destacan principalmente las emisiones contaminantes generadas por el uso de automóviles, procesos industriales, comerciales y de servicios. La calidad del aire ambiental se refiere al aire que nos rodea, en el exterior, y se mide usualmente cercano al nivel del suelo, lejos de fuentes directas de contaminación, mientras que la calidad del aire en interiores, como su nombre lo indica, refleja el estado del aire en espacios cerrados como edificios y vehículos, en donde los contaminantes pueden venir tanto del aire exterior, como de fuentes que se encuentren en el interior [33].

En cuanto a la calidad del aire dentro de los vehículos, se consideran dos fuentes de preocupación principales [33]:

- 1) La entrada de gases y partículas contaminantes, tanto de las que existen en el ambiente, como aquellas producto de la combustión y que llegan directamente por el cercanía con los escapes de otros vehículos, ya sea a través del sistema de aire acondicionado y ventilación (HVAC por sus siglas en inglés), o directamente al abrir puertas y ventanas.
- 2) La falta de aire fresco dentro de la cabina, con reducción en la concentración de oxígeno ( $O_2$ ) e incremento en la concentración de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), debido a la respiración de los pasajeros y a la falta de ventilación adecuada.

El concepto de *ventilación* se refiere al movimiento de aire de afuera del vehículo hacia adentro, para mejorar la calidad del aire, causando a su vez que los pasajeros se sientan frescos y cómodos. En espacios cerrados, donde la ventilación es provista por medios mecánicos o por medio de sistemas de aire acondicionado, la concentración de dióxido sirve como medida de la eficiencia de ventilación, ya que se encuentra en incremento constante al ser producto tanto de la respiración humana como de otros procesos biológicos y guarda a su vez una relación proporcional en la disminución de la concentración de oxígeno.

#### Formas de medición de calidad del aire

Al igual que los sensores para temperatura y humedad, cuando se mide calidad del aire se busca utilizar los instrumentos que brinden mayor exactitud, precisión y sensibilidad. Sin embargo, en el caso de la medición de calidad del aire en vehículos, existen otros atributos críticos para la selección de sensores, que son el costo, el tamaño y la simplicidad de uso.

De acuerdo con estos atributos, se pueden identificar tres tipos de tecnologías para la medición de calidad del aire [33]:

- *Tecnología de óxido de metal semiconductor (SMO)*: Como su nombre lo indica, están compuestos por un elemento de metal semiconductor. Al calentarse, causan que los gases de reducción u oxidantes reaccionen en la superficie de la película de metal, cambiando la conductividad del semiconductor conforme a la concentración del gas que se busca medir.
- *Tecnología electroquímica (EC)*: Son sensores electrolíticos formados por electrodos en contacto con un líquido electrolítico. Cuando el gas que se quiere medir se difunde dentro del sensor, reacciona con los electrodos, cambiando su potencial en proporción al nivel de concentración del gas.
- *Tecnología óptica o infrarroja (IR)*: Estos sensores, conformados por un elemento óptico para la medición del gas, experimenta cambios en la transmisión de luz conforme a la presencia del gas determinado.

### 1.3.4 Concentración de CO<sub>2</sub>

Existen serios efectos en la salud provocados por la presencia de contaminantes en la cabina del automóvil, siendo la fatiga una de las más peligrosas, ya que es una de las principales causas de accidentes automovilísticos, con resultados fatales en la mayoría de los casos y que se presenta casi siempre en los períodos de conducción de larga duración.

Algunos de los síntomas asociados a la fatiga son la sensación de sueño o letargo, la pérdida de atención, falta de habilidad para concentrarse y reacción lenta, todos ellos de vital repercusión en la conducción. Además de la falta de sueño, estos síntomas de la fatiga pueden ser derivados debido a la presencia de contaminantes como monóxido y dióxido de carbono, y otros elementos presentes en el aire [33].

En un estudio de la calidad del aire en los vehículos, se observó que la razón de ondas cerebrales del tipo alfa, asociadas a un estado de relajación y bajo nivel de alerta, incrementa cuando el sujeto se encuentra en un ambiente que contiene altos niveles de dióxido de carbono, por lo que tienden sentirse adormilados, a tener dolores de cabeza, entrar en estado de descuido o funcionar en niveles de actividad menores [34, 35].

El dióxido de carbono es un gas sin olor ni color, no inflamable y más denso que el aire. Es el cuarto gas más común en la atmósfera terrestre, conformando del 0.03 al 0.04% del aire que respiramos diariamente, pues se encuentra en concentraciones de entre 300 y hasta 400 partes por millón (ppm) en el ambiente, con un incremento aproximado de 2 ppm al año [36, 37]. A su vez, juega un papel esencial en el metabolismo de los humanos y es el principal derivado de los organismos vivos.

Si bien es cierto que a niveles atmosféricos no resulta peligroso, en espacios cerrados, al tratarse de un gas más denso, el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> genera desplazamiento de O<sub>2</sub>, dejando un ambiente deficiente en cuanto a la concentración de oxígeno. De acuerdo con la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA), un ambiente con deficiencia de O<sub>2</sub> se considera peligroso cuando la concentración es menor a 19.5% [33]. La norma 62-2001 de la ASHRE determinó que la concentración de dióxido de carbono recomendada para un espacio cerrado no debe ser mayor a 700 ppm por encima de la concentración exterior.

Cuando la concentración de CO<sub>2</sub> excede los niveles aceptables, puede causar efectos diversos en el comportamiento y salud de las personas, como dolores de cabeza, mareos, sudoración, alteraciones visuales, ritmo cardíaco acelerado, además de que en altas concentraciones puede ser llegar a ser letal. La gravedad de estos efectos depende del nivel de concentración y el tiempo durante el cual el individuo se encuentre expuesto a ellas [34, 37]. Los efectos correspondientes a distintos niveles de CO<sub>2</sub> se resumen en la tabla 1.2.

En un espacio reducido y confinado, como el interior de la cabina de un automóvil, el proceso natural de respiración puede agravar estos efectos, ya que al respirar exhalamos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), incrementando constantemente la concentración de dicho gas. La tasa de producción de CO<sub>2</sub> en el proceso natural de la respiración depende del metabolismo y el nivel de actividad física, como se muestra en la Figura 1.8, siendo la tasa de generación promedio por persona de 0.3 L/min (310 mL/min), correspondiente a un nivel de actividad de 1.2 met (estado de reposo) [25, 38] y un poco mayor en cuanto a la conducción, que representa un nivel de actividad de aproximadamente 1.5 met., por lo que en la zona del conductor el incremento es un poco mayor que en las demás regiones de la cabina.

Concentración CO <sub>2</sub> [ppm]	Efecto
350 – 450	Nivel normal en el aire del exterior
< 600	Niveles aceptables
600 – 1000	Molestias por intensidad u olores
< 1000	Límite de estándares ASHRAE y OSHA
1000 – 2500	Somnolencia general
2500 – 5000	Efectos adversos en la salud
< 5000	Concentración máxima permitida en un periodo de trabajo de 8 horas
30,000	Ligera intoxicación, aumento en tasa respiratoria y pulso, náusea
50,000	Dolor de cabeza agudo y ligera incapacidad
100,000	Inconciencia, exposición a la muerte

Tabla 1.2 – Efectos a distintas concentraciones de CO<sub>2</sub> [39]

Asimismo, existe una relación entre la concentración de dióxido de carbono y el número de pasajeros en el vehículo, como se observa en la Figura 1.9, llegando a presentarse concentraciones cercanas 10,000 ppm cuando se encuentran tres o más ocupantes en la cabina, misma relación que se afecta cuando se emplea el modo de recirculación del aire acondicionado [34], el cual es usualmente el método de ventilación que la mayoría de la gente ocupa en ciudades con alto índice de contaminación, donde se corre el riesgo de permitir el ingreso de partículas y gases contaminantes al ocupar la ventilación directa por la apertura de ventanas.

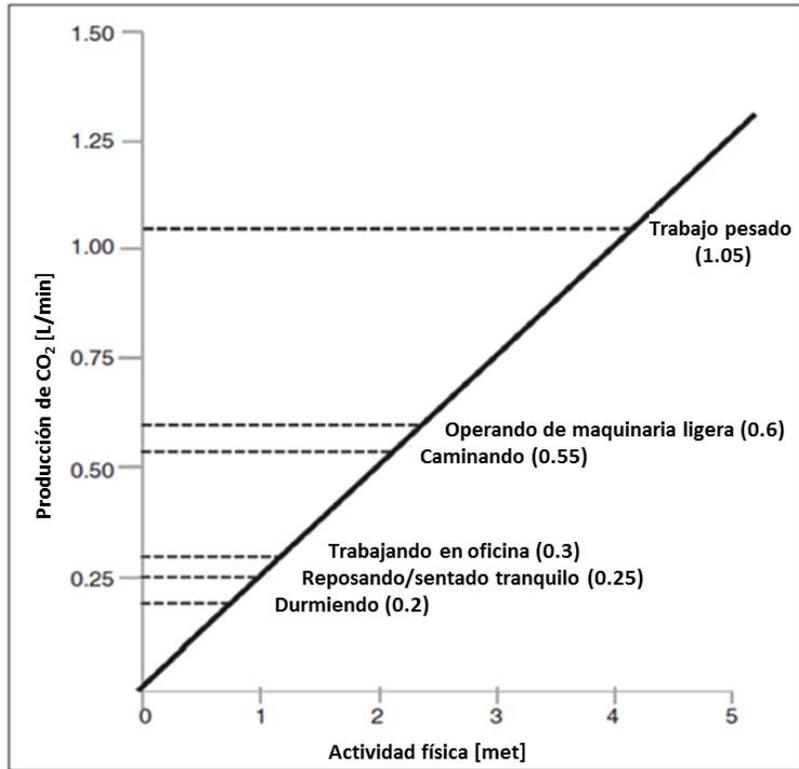


Figura 1.8 – Generación de CO<sub>2</sub> respecto al nivel actividad física [40]

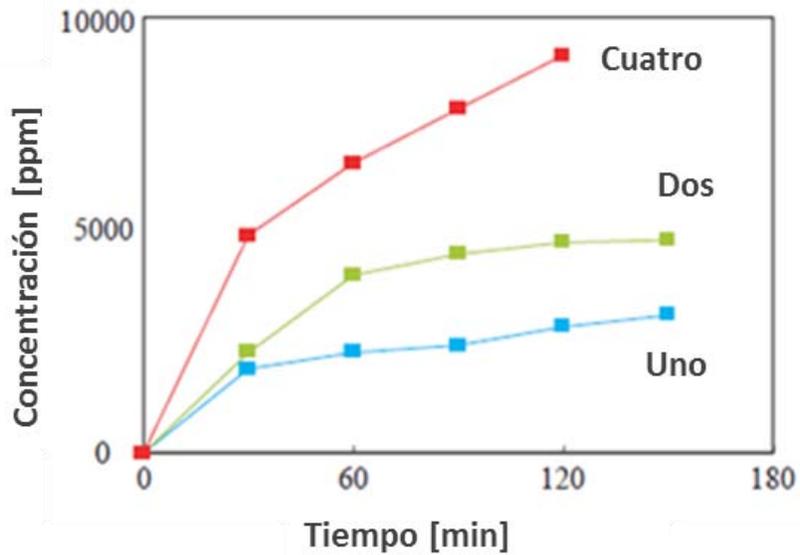


Figura 1.9 – Concentración de CO<sub>2</sub> respecto al número de pasajeros [34]

## 1.4 Estado del arte

En el año 2004, se elaboró por parte del Instituto Mexicano el Transporte, dentro de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, un estudio sobre la aplicación de simuladores de manejo para la capacitación de conductores de camiones [18], en el cual se incluye el análisis de los diferentes aspectos que intervienen en el aprendizaje, así como la propuesta de un simulador, haciendo una descripción de las características generales y elementos principales de los simuladores de manejo.

En nuestro país existen algunas iniciativas para el empleo de simuladores para la capacitación de conductores. En el año 2013, se presentó una propuesta por parte de la Secretaría de Vialidad y Transporte del estado de Jalisco, para la incorporación de un simulador para reemplazar los exámenes prácticos para la obtención de la licencia, esto con el fin de reducir los riesgos que se puedan presentar cuando los candidatos no posean las habilidades o conocimientos suficientes al realizar la prueba [41]. Asimismo, esta misma dependencia cuenta con unidades de simulación de alcoholismo, que se emplean para sensibilizar a los usuarios de los peligros de manejar en estado de ebriedad [42].

Asimismo, en nuestro país existen empresas como CONDUCE Centros de Capacitación México, que se dedica a la capacitación de conductores, especialmente de camiones, para el desarrollo seguro de sus actividades. Esta empresa utiliza programas de capacitación que incluyen el empleo de tecnologías de simulación para la enseñanza y evaluación de los conductores. Los simuladores empleados por CONDUCE son una combinación de escritorio y panorámico y se enfocan en la percepción visual y auditiva del conductor, aunque algunos de los equipos más avanzados se cuenta también con estimulación a través de movimientos.

Si bien existen centros de desarrollo y diseño de vehículos en México, las pruebas realizadas en simuladores de investigación, no se realizan en nuestro país, ya que hasta el momento no se cuenta con ningún simulador de este tipo en nuestro país.

A nivel internacional, como se mencionó previamente, existen avanzados simuladores que incluyen sistemas para la representación de la actividad de conducción, con mayor o menor nivel de complejidad y fidelidad [19]. Estos simuladores cuentan cada vez más con notables avances en tecnología para la reproducción de imágenes, sonidos, movimientos, vibraciones y fuerzas que forman parte de la actividad del manejo de un automóvil, así como la interacción de la iluminación y otros factores que representan algunas condiciones climáticas.

No obstante, hasta el momento ninguno de los simuladores cuenta con un sistema de control de variables ambientales como temperatura, humedad, velocidad del aire, entre otras. El Instituto de Investigación en Transporte y Caminos (VTI) en Suecia, que cuenta en la actualidad con distintos simuladores de conducción de alto nivel, es la única institución que alguna vez incorporó un sistema regulador de temperatura en la cabina. Sin embargo, no se ha realizado ninguna investigación enfocada en el uso de este sistema, ni de los efectos que la incorporación del mismo tiene sobre el desempeño de los participantes.

En cuanto al desarrollo de sistemas para control de variables ambientales en cabinas de automóvil, la mayoría de los investigadores consultados emplean el sistema de aire acondicionado y climatización que contienen la mayoría de vehículos en la actualidad, que emplea un compresor mecánico impulsado por el motor del vehículo, una válvula de expansión para restringir la dirección de bombeo del compresor y dos intercambiadores de calor (evaporador y el condensador), además de un refrigerante que fluye a través del sistema.

Diversas investigaciones han ido incorporando elementos para garantizar mayor comodidad de los pasajeros y su seguridad, como filtros de aire para mejorar la calidad del mismo [43], o sistemas de control automático que buscan mejorar la eficiencia del sistema en términos de disminución en el consumo de energía e incremento en el confort térmico de los pasajeros [23, 44, 45].

Existen también algunas propuestas de utilización de actuadores de calor (resistencias), turbinas y bombeo de aire frío, humidificadores, etc., para el control de las variables ambientales dentro de un automóvil [44].

Otra de las alternativas para el control de la climatización de la cabina del automóvil, reemplazando el sistema común de aire acondicionado, plantea el uso de sistemas basados en tecnología termoeléctrica, a través de configuraciones que emplean módulos o celdas de Peltier, así como la transferencia de calor por convección forzada, para la modificación de la temperatura del aire [46, 47].

Asimismo, se han desarrollado varios sistemas para el control y monitoreo de la temperatura en otros entornos y procesos, como invernaderos [48], incubadoras de huevos [49, 50], entre otros, en donde se han empleado distintos tipos de sensores y actuadores para mantener las condiciones ambientales dentro de un rango específico (establecido por el usuario), que podrían bien ser implementadas y probadas para su uso en otros entornos, como cabinas de transporte. Por otra parte, muchos de los proyectos de control y monitoreo de variables ambientales [48, 50, 51] se han valido del desarrollo de interfaces de monitoreo y control empleando la plataforma de programación gráfica LabVIEW, presentando resultados que acreditan su uso.

# **CAPÍTULO 2**

# CAPÍTULO 2- DISEÑO CONCEPTUAL

## 2.1 Identificación de la necesidad

El problema se centra en el monitoreo y control de las variables ambientales dentro de la cabina de un auto ya que, como se ha observado, el comportamiento y desempeño del conductor se puede afectar tanto positiva como negativamente bajo condiciones distintas. De tal manera que la búsqueda para garantizar la seguridad y confort (comodidad) de los conductores se ha convertido en prioridad para la investigación y ha derivado en el desarrollo de diversos sistemas, que son usualmente probados y validados en ambientes de simulación.

La problemática surge de la necesidad de contar con ambientes de simulación que proporcionen un ambiente lo más real posible, estimulando todos los canales perceptuales de los usuarios, a través de la integración de la mayor cantidad de variables que se involucran en el proceso de conducción.

Como se mencionó anteriormente, los simuladores de conducción empleados en la actualidad han logrado incorporar estímulos visuales, auditivos y cinestésicos a través de sistemas avanzados que proporcionan un ambiente con un grado de realismo aceptable. Sin embargo, ninguno de los simuladores de conducción actuales cuenta con sistemas que reproduzcan las condiciones climáticas, principalmente la temperatura y humedad, las cuales son constantemente percibidas en las actividades reales, por lo que su incorporación proveería un grado de fidelidad mayor.

De ahí que el presente trabajo busque proponer un sistema capaz de llevar y mantener las condiciones de temperatura y humedad relativa en un intervalo de valores determinado de manera automática a través del monitoreo constante de dichas variables.

Asimismo, con base en la problemática que se presentó anteriormente respecto a los efectos de la concentración de dióxido de carbono dentro de la cabina, el sistema propuesto incorpora el monitoreo de la concentración de dióxido de carbono, con el fin de sentar precedentes para futuras propuestas de solución en materia de ventilación y calidad del aire dentro de las cabinas de automóviles, tanto para investigación (simuladores) como en la vida real.

Cuando se trabaja con simuladores de conducción, en especial con aquellos empleados para investigación, se pueden identificar principalmente dos tipos de usuarios, el *pasajero* o *conductor*, que es quien ingresa en el simulador y lleva a cabo la actividad de conducción, y el *analista* u *observador*, que es quien monitorea y evalúa tanto el desempeño del simulador como del conductor, de acuerdo con los fines de la investigación.

En el caso del presente trabajo, el desarrollo del sistema se relaciona tanto con el usuario conductor como con el observador, sin embargo, debido a que los alcances establecidos limitan la evaluación del sistema desde la perspectiva de este último, el usuario identificado como observador es considerado el cliente, en cuyas necesidades se enfoca el diseño.

## 2.2 Requerimientos y especificaciones del sistema

El concepto de *diseño* se entiende como la formulación de un plan para resolver un problema o satisfacer una necesidad determinada, con el fin de obtener un resultado mediante una acción específica o por medio de la creación de algún producto [52].

Al diseñar un producto, es necesario identificar sus *requerimientos*, es decir, aquellos atributos, propiedades o características que expresan los deseos y expectativas del cliente o usuario para quien se está diseñando, ya que sirven como guía durante el desarrollo, pues establecen prioridades de diseño y proporcionan referencias para evaluar la medida en que el producto satisface la necesidad [53].

En el caso del presente proyecto, no existe una solución que satisfaga específicamente el problema planteado, por lo que se obtuvieron los requerimientos a partir de la observación de las soluciones existentes para problemas similares, así como de los alcances que se buscan conseguir con el sistema propuesto.

Para que el sistema propuesto resuelva la necesidad identificada se requiere:

- *Que lea las variables (Lectura de variables):* el sistema debe ser capaz de obtener los valores correspondientes a la temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> dentro de la cabina del automóvil.
- *Que registre las variables (Visualización y almacenamiento):* el sistema debe poder presentar los valores leídos en una interfaz y tener la capacidad de almacenar la información obtenida en el total de la prueba.
- *Que sea confiable (Confiabilidad):* los datos leídos y registrados deberán representar de manera real las condiciones en la cabina.
- *Que sea de fácil manejo (Facilidad de manejo):* que la interfaz presente la información y controles de manera ordenada, clara y directa.
- *Que modifique las variables (Modificación de variables):* que sea capaz de modificar las condiciones en la cabina.
- *Que sea automático (Intervención de usuarios):* una vez activo, el sistema debe ser capaz de monitorear las variables y activar los actuadores sin intervención manual de los participantes.
- *Que sea rápido (Velocidad de funcionamiento):* debido a que se busca mantener las condiciones en un rango determinado, la respuesta tanto de la lectura como de los actuadores del sistema para modificar las variables debe ser rápido.
- *Que sea seguro (Seguridad):* se requiere que el sistema no pueda representar ningún tipo de riesgo para la salud del usuario.

- *Que no interfiera con las pruebas (Discreción/Transparencia)*: debido a que se trata de un sistema para usarse en un simulador, se requiere que su presencia no interfiera con las pruebas que se lleven a cabo dentro del mismo, es decir, que no sea causa de distractor o reductor de la sensación de realismo dentro del simulador. El concepto de discreción se refiere a que los elementos que componen el sistema tengan un tamaño y colocación tales que no causen interferencia visual o auditiva durante las pruebas en el simulador.

Si bien todos los requerimientos mencionados representan algún atributo que se espera del sistema que se va a diseñar, es necesario identificar cuáles de estas características precisan mayor atención, es decir, cuales son los aspectos fundamentales que se deben considerar en el desarrollo del producto.

En la tabla 2.1 se muestra la clasificación de los requerimientos, basada en una jerarquización por nivel de importancia, con una escala del 1 al 5, donde 1 representa la menor importancia y 5 la mayor, considerando como más importantes los requerimientos que guardan mayor relación con el cumplimiento del objetivo establecido. La ponderación mencionada se basó en la opinión del cliente para quien se está diseñando el producto, que en este caso es el usuario observador, con base en la información recopilada en la investigación referente a sistemas similares existentes.

No. de requerimiento	Requerimiento	Importancia
1	Monitoreo	5
2	Visualización y almacenamiento	4
3	Confiabilidad	5
4	Facilidad de manejo	3
5	Modificación de variables	5
6	Intervención humana	3
7	Velocidad de funcionamiento	5
8	Seguridad	3
9	Transparencia <sup>1</sup>	2

Tabla 2.1 – Jerarquización de requerimientos

Para poder traducir las características cualitativas descritas en los requerimientos, es necesario expresarlas en términos medibles o medidas, es decir, el grado en que el producto satisface la necesidad. Cuando se establece la relación medida-necesidad, y se determina un valor con unidades, se genera una *especificación*, que no es más que la explicación con detalle preciso y medible de lo que el producto tiene que hacer [53]. La Figura 2.1 presenta la matriz de relación entre los requerimientos y las medidas correspondientes.

<sup>1</sup> Hace referencia a la definición de *transparencia* empleada en computación, donde es sinónimo de invisible o indetectable, es decir, aquellos sistemas o procedimientos de los cuales el usuario no es consciente o no percibe [69].

REQUERIMIENTO	MÉTRICA																
	Tiempo de operación	Número de sensores	Rango de operación	Número de señales simultáneas	Interfaz gráfica	Capacidad de almacenamiento	Tolerancia	Tiempo de respuesta	Número de indicadores	Número de controles	Número de actuadores	Intervención de usuarios	Velocidad de procesamiento	Voltaje de operación	Distancia con usuarios	Tamaño (volumen)	Nivel de ruido
1 Monitoreo	●	●	●														
2 Visualización y almacenamiento				●	●	●											
3 Confiabilidad							●	●									
4 Accesibilidad								●	●								
5 Modificación de variables			●								●						
6 Intervención de usuarios												●					
7 Rapidez								●					●				
8 Seguridad														●	●		
9 Discreción																●	●

Figura 2.1 – Matriz de relación requerimiento - métrica

Al ser el diseño de un producto un proceso iterativo, se identifican dos tipos de especificaciones: las *especificaciones objetivo*, que representan las aspiraciones de diseño, y se establecen cuando se identificaron las necesidades pero aún se desconocen las restricciones de tecnología, es decir, antes de generarse los conceptos; y las *especificaciones finales*, que son el resultado de la revisión de las especificaciones objetivo, ya que éstas pueden no satisfacer o pueden exceder las expectativas una vez que ya se han probado los conceptos de solución. Para los fines del presente proyecto, el desarrollo se llevó a cabo tomando en cuenta las especificaciones objetivo, sin determinar especificaciones finales.

En la Tabla 2.2 se presenta la ponderación de las especificaciones, en donde se enlistan las métricas mostradas en la matriz de relación con los requerimientos correspondientes, así como las unidades en que se miden y el intervalo de valores sugerido. La escala de valoración empleada para la jerarquización de las especificaciones es el mismo que se empleó para los requerimientos, con la diferencia que para esta ponderación se tomaron en consideración las limitaciones en cuanto a recursos disponibles y el grado de dificultad técnica de dichas especificaciones.

No. DE ESPECIFICACIÓN	REQUERIMIENTO RELACIONADO	MÉTRICA	UNIDADES	VALOR SUGERIDO	IMPORTANCIA	
1	1	Tiempo de operación	Min	30 a 90	3	
2	1	Número de sensores	Temperatura (T)	≥ 2	4	
			Humedad relativa (HR)	≥ 2		
			Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	1		
3	1, 5	Rango de operación	T	°C	0 a 50	5
			HR	%	0 a 100	
			CO <sub>2</sub>	Ppm	350 a 10000	
4	2	Número de señales simultáneas	#	≥ 3	5	
5	2	Interfaz gráfica	Subjetiva	n/a	5	
6	2	Capacidad almacenamiento (memoria)	kB	≥14	3	
7	3	Tolerancia	T	°C	±0.5	5
			HR	%	±5	
			CO <sub>2</sub>	Ppm	±50	
8	3,7	Tiempo de respuesta	s	≤5	5	
9	4	Número de indicadores	#	≥ 3	4	
10	4	Número de controles	#	≥ 3	4	
11	5	Número de actuadores	T	#	≥ 2	5
			HR	#	≥ 2	
			CO <sub>2</sub>	#	≥ 1	
12	6	Intervención de usuarios	Subjetiva	n/a	5	
13	7	Velocidad de procesamiento <sup>2</sup>	Frecuencia de muestreo	kS/s	≥ 10	5
			Velocidad de reloj	MHz	≥ 16	
14	8	Voltaje de operación	DC	V	5 a 24	2
			AC	V	115 a 227	
15	8	Distancia con usuarios	M	0.3 a 1	3	
16	9	Tamaño (volumen)	m <sup>3</sup>	≤0.25	3	
17	9	Nivel de ruido	dB	35 a 45 <sup>3</sup>	2	

Tabla 2.2 – Jerarquización de especificaciones objetivo

<sup>2</sup> No toma la definición de velocidad de procesamiento, se entiende a través de otros dos conceptos.

<sup>3</sup> Rango en que se considera aceptable para la captación de conversación, de acuerdo a los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud [54].

Una herramienta que ayuda a visualizar de manera gráfica la relación entre requerimientos y especificaciones es la matriz de *despliegue de la función de calidad* (Quality Function Deployment o QFD), donde la jerarquización por grado de importancia de los requerimientos se presenta en la sección horizontal, mientras que la evaluación de las medidas, métricas o especificaciones técnicas se realiza en la sección vertical, dejando la identificación de la relación requerimiento-especificación en la parte central. Haciendo una comparación de las evaluaciones y la correlación de los requisitos técnicos se determina el valor central o nivel de funcionamiento que debe alcanzarse para resolver el problema, obteniendo el mayor grado de satisfacción de los requerimientos del cliente.

A partir de la matriz QFD generada para el presente trabajo, la cual se anexa en el APÉNDICE A, se identificaron las áreas en dónde es necesario enfocarse durante el desarrollo del producto, sirviendo como guía para las acciones que es necesario tomar, así como los elementos que deben ser elegidos con mayor cuidado para brindar un mayor grado de calidad al producto final, en cuanto a la satisfacción de la necesidad. A continuación se enlistan las métricas por orden de prioridad, de acuerdo con los resultados de la evaluación de la matriz QFD.

1. Tiempo de respuesta<sup>4</sup>
2. Velocidad de procesamiento
3. Interfaz gráfica
4. Número de actuadores
5. Número de señales simultáneas
6. Número de controles
7. Número de indicadores
8. Tolerancia
9. Voltaje de alimentación
10. Distancia con usuarios
11. Número de sensores
12. Tamaño
13. Tiempo de operación
14. Rango de operación
15. Intervención de usuarios
16. Nivel de ruido
17. Capacidad de almacenamiento

La característica que obtuvo un mayor puntaje en la evaluación y que es por lo tanto aquella que tiene mayor nivel de importancia es el tiempo de respuesta. Esta característica hace referencia tanto al tiempo de respuesta de los sensores que servirán para el monitoreo de las variables, como al tiempo de respuesta del sistema en cuanto a la activación de los actuadores, para lograr la modificación.

En segundo lugar se encuentra la velocidad de procesamiento. Esta característica que está implícitamente asociada con el tiempo de respuesta, pues hace referencia a la rapidez con que el sistema es capaz de procesar la información que recibe, representarla (monitoreo), analizarla para decidir si activar o no los actuadores y enviar la orden de activación, por lo que, mientras menor sea la velocidad de procesamiento, más lento se vuelve el sistema, y mayor es el tiempo de respuesta. A su vez,

---

<sup>4</sup> Se considera únicamente el tiempo de respuesta de los sensores, debido a que el tiempo de respuesta del resto del sistema (interfaz y actuadores) depende directamente de éste.

la interfaz gráfica como característica que se refiere al despliegue de la información del sistema, tanto de entrada como de salida, obtuvo el tercer nivel en importancia.

Se puede observar que estas características que se encuentran en los niveles más altos de prioridad se relacionan de manera directa con el cumplimiento de los objetivos del sistema.

Por otra parte, el hecho de que las demás características se encuentren en un nivel de prioridad inferior, no significa que sean menos importantes, ya que todas se relacionan en la búsqueda de satisfacer la misma necesidad y se ven involucradas en el desarrollo del producto, aún si se pone mayor enfoque en las características marcadas como prioritarias.

## 2.3 Análisis funcional del sistema

Existen algunos casos, como el del presente trabajo, en que la necesidad que se busca satisfacer resulta demasiado compleja para resolverse como un sólo problema, ya sea por la cantidad de variables involucradas o por la tecnología necesaria para lograrlo, entre otros factores. En tales casos se recomienda utilizar el método de *descomposición*, el cual consiste en la división de un problema en subproblemas o problemas más sencillos. Esto se puede llevar a cabo con ayuda de esquemas o herramientas gráficas, como la descomposición o análisis funcional, que es la que se emplea en el presente escrito.

La *función* es la actividad propia u objetivo de un producto o sistema, es decir, aquello que debe hacer, su finalidad. Dentro de la descomposición funcional es necesario identificar dos tipos de funciones:

- *Funciones primarias, generales o globales:* se refieren al trabajo específico que el sistema o producto está diseñado para cumplir.
- *Sub-funciones o funciones secundarias:* son todas aquellas funciones o actividades adicionales necesarias para que se logre realizar la función primaria o las que resulten de la realización de ésta.

Para realizar el análisis del sistema con respecto a su función se emplean distintos tipos de herramientas gráficas, o diagramas, los cuales se muestran a continuación.

### Diagrama de caja negra

La primera herramienta, denominada *diagrama de caja negra*, permite una visión más clara del sistema como un conjunto, ya que representa la forma en que éste interactúa con el medio que lo rodea, en función de *qué hace*, sin dar importancia al *cómo lo hace*.

En este diagrama, como su nombre lo dice, representa al sistema como una *caja negra*, describiendo su función general o principal desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas o respuestas que produce, sin considerar el funcionamiento interno (lo que se encuentra dentro de la caja).

Es necesario definir muy bien la interfaz o conexión que existe entre el sistema y el entorno, a través de los flujos de material, energías y señales que ingresan a la caja negra (entradas) y los que resultan o se producen en ella (salidas).

La Figura 2.2 muestra el diagrama de caja negra generado para el sistema de monitoreo y control de las variables ambientales en la cabina de un automóvil que se propone en este trabajo.



Figura 2.2 – Diagrama de caja negra del sistema

### Diagrama de caja transparente o diagrama de subsistemas

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de la descomposición es dividir el problema general en problemas más sencillos, con el fin de establecer soluciones de forma enfocada que lleven a la solución general. Cuando se hace la descomposición en subsistemas, se pueden seleccionar aquellos que son más críticos para el éxito del producto o sistema que se diseña.

Una vez que se entendió la función general del sistema a través del diagrama de caja negra, lo que sigue es “destapar” la caja, o dicho de otra manera, observar cuales sistemas conforman el sistema global. Para generar una descripción más específica de lo que cada elemento del producto puede hacer para lograr la función general del producto se elabora un *diagrama de caja transparente* o *diagrama de subfunciones*, el cual, como dice el nombre, representa la relación entre las funciones primarias y las subfunciones, estableciendo una estructura funcional más completa. Por lo general, cada subsistema puede dividirse en subsistemas aún más sencillos, como se puede observar en la Figura 2.3, donde se muestra el diagrama de subsistemas generado para el sistema propuesto. En este diagrama las líneas continuas denotan la transferencia y conversión de energía, mientras que las líneas discontinuas o punteadas representan las señales de flujos de control y retroalimentación dentro del sistema.

El diagrama de subfunciones, como se mencionó anteriormente, ayuda a planear la estructura del sistema de manera más enfocada. Si bien las entradas y salidas representadas tanto en el diagrama de caja negra como en el diagrama de subsistemas son las mismas, en éste último la entrada “Señales de variables ambientales”, que representaba un concepto muy general, en función de las señales de las tres variables que se eligieron para este proyecto: temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono. Lo mismo sucede en el caso de la salida “Modificación de variables ambientales”, donde se aclara cuáles son las variables específicas que se busca modificar.

A su vez, se ilustra la interacción entre las entradas y las salidas, a través de la identificación del flujo de la información, así como de los distintos subsistemas que se describen a continuación.

- i) *Sistema de suministro de energía*: Este sistema, como su nombre lo indica, es el encargado de recibir la entrada de energía eléctrica, y de administrarla a los distintos dispositivos que conforman los demás sistemas, empleando como medio las fuentes de energía, así como aquellos sistemas de acondicionamiento de la señal o amplificación (potencia), en caso de ser necesarios.

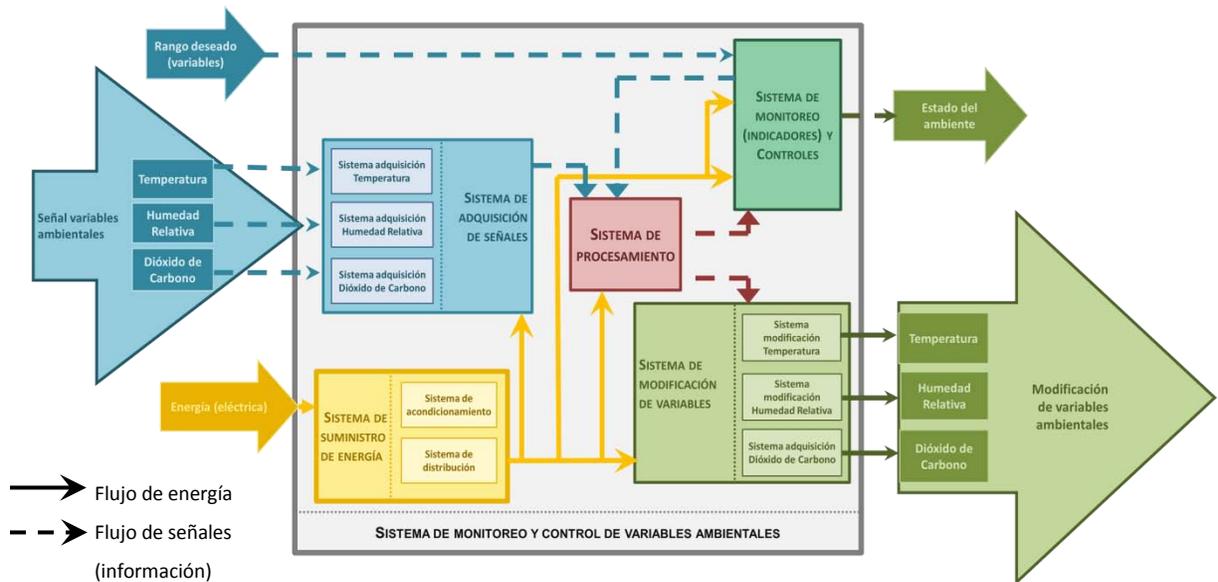


Figura 2.3 – Diagrama de subsistemas

- ii) *Sistema de sensado de variables:* A través de éste sistema es cómo se obtendrá la señal correspondiente al estado de las variables ambientales dentro de la cabina, por medio de sensores y circuitos de acondicionamiento (en caso de ser necesarios).
- iii) *Sistema de procesamiento:* Así como se visualiza en el diagrama, este sistema es el cerebro del sistema o punto central, que se encargará de recibir las señales de las variables, procesarlas (compararlas) con las entradas de valores establecidas por el usuario y enviar las señales de activación al sistema de modificación de las variables. Asimismo, será el encargado de realizar el almacenamiento de los valores generados durante el tiempo de operación del sistema. El medio principal de éste sistema es un microcontrolador, con la programación necesaria para llevar a cabo la función anteriormente descrita.
- iv) *Sistema de controles:* Este sistema se encargará de recibir los datos de entrada proporcionados por el usuario para establecer los rangos de valor determinados para las variables, es decir el valor objetivo al cual se desea mantener el sistema. Debido a que se busca que el sistema realice las acciones de manera automática, se empleará la interfaz gráfica como único medio de interacción con el usuario, para la recepción de datos, que serán enviados directamente al sistema de procesamiento.
- v) *Sistema de indicadores:* Este sistema será el encargado de desplegar la información del estado ambiental, proveniente de sistema de adquisición de las señales de variables (tras su paso por el sistema de procesamiento). Al tratarse del encargado de poner la información al alcance del usuario, empleará al igual que el sistema de controles la interfaz gráfica como medio de interacción.
- vi) *Sistema de modificación de variables:* Este sistema se encargará de modificar las variables ambientales objetivo (temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono) por medio de la activación de actuadores, según lo determine el sistema de procesamiento, conforme a los valores determinados en el sistema de controles.

## Diagrama de medios y funciones

En el proceso de creación de los diagramas de caja negra y subsistemas se determinaron los distintos sistemas que conformarán el producto final. Asimismo se describieron dichos sistemas, mencionando sus funciones y los medios a través de los cuales se buscará lograr que dichas funciones subfunciones se realicen.

Para complementar el análisis, se recomienda organizar y visualizar la relación de funciones y subfunciones con sus respectivos medios o implementos, empleando una herramienta gráfica conocida como diagrama o árbol de funciones y medios, como el que se muestra en la Figura 2.4.

En este diagrama, se presentan las funciones en orden de jerarquía, empezando por la función principal en el nivel más alto del diagrama, ubicando las subfunciones en los niveles subsecuentes y alternando en cada nivel los medios necesarios para implementarlas.

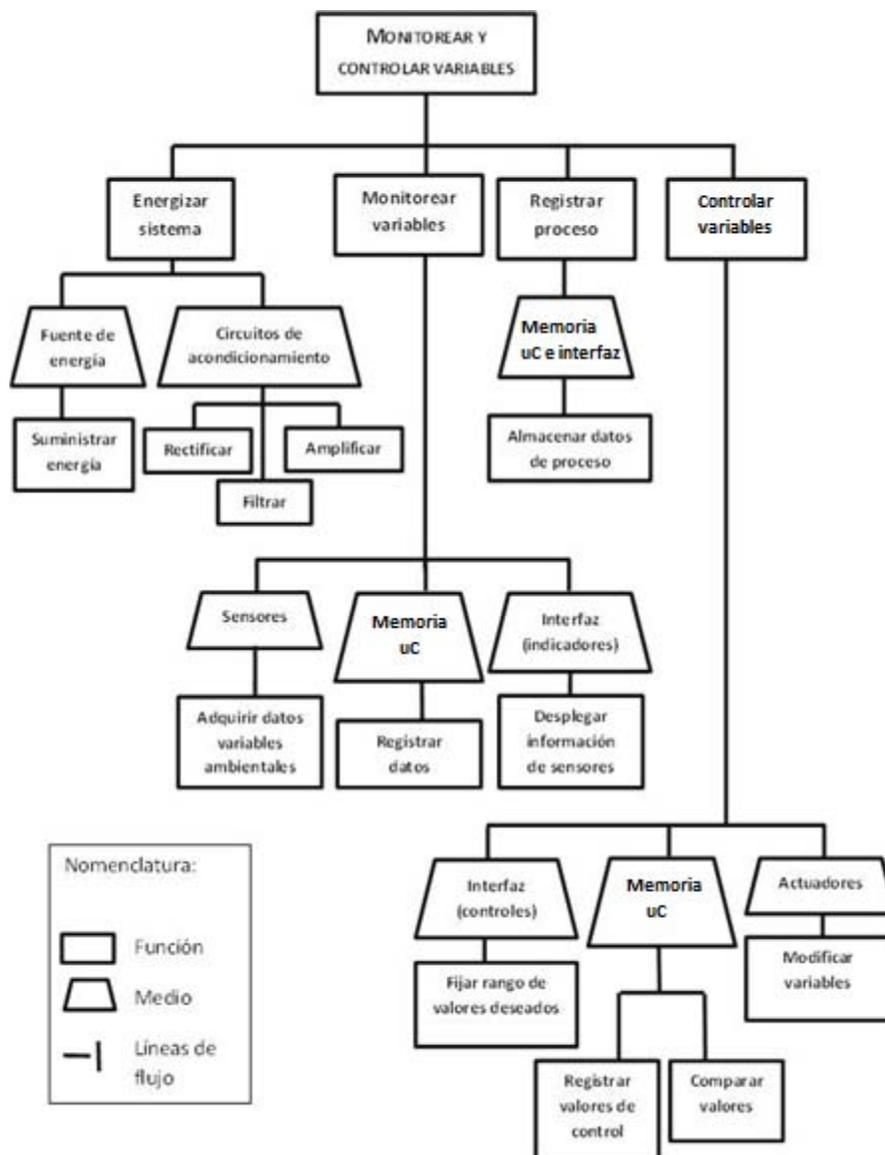


Figura 2.4 – Diagrama de medios y funciones

## 2.4 Generación del concepto

El concepto de un producto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto, a través de la explicación concisa de cómo el producto busca satisfacer las necesidades del cliente [53].

Las necesidades y especificaciones objetivo o especificaciones preliminares del producto, así como las funciones y subfunciones que se describieron anteriormente, sirven como entradas para la generación de conceptos de solución del problema, a través del planteamiento de medios, procedimientos o herramientas que puedan lograr las funciones de cada sistema. A continuación se presentan algunas soluciones posibles para cada subsistema.

SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA*			
ELEMENTO	VOLTAJE DE ENTRADA	VOLTAJE DE SALIDA	CORRIENTE MÁXIMA DE SALIDA
Fuente de poder para PC	AC 115, 227 [V]	DC -5, -12, +3.3, +5, +12 [V]	19 [A]
Fuente de poder para laboratorio	AC 100-240 [V]	DC 0 a +30 [V]	10 [A]
Cable eliminador/ adaptador de corriente	AC 100-240 [V] @ 0.8 [A] máx.	DC +12 [V]	8.3 [A]
Batería recargable (Automóvil)	DC 12[V] DC 24[V]	DC +12 [V]	15 [A] <sup>5</sup>

Tabla 2.3 – Propuestas de solución para el Sistema de suministro de energía

SISTEMA DE SENSADO DE VARIABLES SUBSISTEMA: SENSADO DE TEMPERATURA						
SENSOR	TIPO	RANGO DE OPERACIÓN [°C]	TIEMPO DE RESPUESTA [s]	TOLERANCIA [°C]	VOLTAJE DE OPERACIÓN [V]	DIMENSIONES [MM]
S 409 - 4908	Termopar K	-100 a +250	0.1	±01.5	-	∅0.2
CL-101	Termistor	-50 a +175	-	±25.0%	110, 230 AC	23.62, ∅5.59
LM35	CI analógico	-55° a +150	2	±0.5	4 a 30	-
MAX6612	CI analógico	-55° a +150	1.5	±1.2	2.4 a 5.5	2.2 x 1.35 x 1.1
RHT03	CI digital	-40 a +80	2	±0.5	3.3 a 6	15.1 x 20 x 7.7
DS18B20	CI digital	-55 a +125	0.75	±0.5	3.0 a 5.5	-

Tabla 2.4 – Propuestas de solución para el Sistema de sensado de temperatura

<sup>5</sup> Corriente de descarga promedio obtenida al considerar una batería con capacidad de 60 [Ah] (Ampere-hora) cargada por completo, trabajando durante 4 horas seguidas.

SISTEMA DE SENSADO DE VARIABLES						
SUBSISTEMA: SENSADO DE HUMEDAD RELATIVA						
Sensor	Tipo	Rango de operación [%RH]	Tiempo de respuesta [s]	Tolerancia [%RH]	Voltaje de Operación [V]	Dimensiones [mm]
<b>RHT03</b>	Capacitivo Digital	0 a 100	2	±2	3.3 a 6	15.1 x 20 x 7.7
<b>HHT02D</b>	Capacitivo Digital	0 a 100	4	±4.5	2.4 a 5.5	4.93 x 7.47 x 2.5
<b>HIH-4030</b>	Capacitivo Analógico	0 a 100	5	±3.5	5	4.17 x 8.59 x 2.95
<b>HCT01</b>	Capacitivo Analógico	0 a 100	≤6	± 2	5	5 x 5 x 0.95

Tabla 2.5 – Propuestas de solución para el Sistema de sensado de humedad relativa

SISTEMA DE SENSADO DE VARIABLES						
SUBSISTEMA: SENSADO DE CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub>						
Sensor	Tipo	Rango de operación [ppm]	Tiempo de calentamiento	Tiempo de respuesta [s]	Tolerancia [ppm]	Voltaje de Operación [V]
<b>MG811</b>	Electrolítico	350 a 10000	30 - 60 s	<60	-	6
<b>TGS 4161</b>	Electrolítico	350 a 10000	-	1.5 min	-	5
<b>CO2S-C100</b>	Infrarrojo	0 a 10000	<3 min	9 s a 2 min	±40	3.3 a 5.5
<b>COZIR</b>	Infrarrojo	0 a 5000	<10	< 3	±50	3.3 a 5.5

Tabla 2.6 – Propuestas de solución para el Sistema de sensado de concentración de CO<sub>2</sub>

SISTEMA DE PROCESAMIENTO						
DISPOSITIVO	MICROCONTROLADOR	ENTRADAS / SALIDAS	PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	FRECUENCIA DE MUESTREO	VELOCIDAD DE RELOJ	MEMORIA
<b>Arduino UNO</b>	ATmega328	6 AI 14 DI/O (6 PWM)	USB-serial, SPI, I2C	10 kS/s	16 MHz	Flash 32 kB SRAM 2 kB
<b>PIC16F887</b>	PIC16F887	35 I/O 1 DI 14 ADCC	SPI, I2C	n/e <sup>6</sup>	0-20 MHz	Flash 14 kB RAM .368 kB
<b>NI USB-DAQ6009</b>	n/e	8 AI, 2AO 12 DI/O 1 DI	USB 2.0	48 kS/s	n/e	n/e
<b>TI MSP430 Launchpad</b>	MSP430G2553	24 I/O	SPI, I2C	n/e	16 MHz	Flash 16 kB RAM 0.512 kB

Tabla 2.7 – Propuestas de solución para el Sistema de procesamiento

SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROLES			
INTERFAZ GRÁFICA			
PLATAFORMA	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	APLICACIONES	COMUNICACIÓN CON HARDWARE
<b>NI LabVIEW</b>	G (lenguaje gráfico)	Adquisición de datos, procesamiento de señales, instrumentación virtual, creación de interfaz gráfica	VISA (VXI, USB, GPIB, RS-232)
<b>Processing IDE</b>	Java (simplificado)	Adquisición de datos, procesamiento de señales y diseño de interfaz de usuario	(RS-232, USB)
<b>Microsoft Visual Studio</b>	VB.NET, C, C++, C#, JavaScript	Adquisición de datos, procesamiento de señales y diseño de interfaz de usuario	(RS-232, USB)

Tabla 2.8 – Propuestas de solución para el Sistema de monitoreo y controles

<sup>6</sup> La frecuencia de muestreo del convertidor analógico-digital (ADC) puede variar al seleccionar la frecuencia de oscilación a través de la programación

SISTEMA DE MODIFICACIÓN DE VARIABLES			
Elemento o conjunto	VARIABLES que modifica	Uso de refrigerantes	Tipo de energía que consume
<b>Aire acondicionado portátil</b>	Temperatura (disminución), Deshumidificación, Ventilación	R410A	Eléctrica
<b>Aire acondicionado vehicular</b>	Temperatura (aumento y disminución), Deshumidificación, Ventilación	R134A	Eléctrica, combustible
<b>Calentador eléctrico, ventiladores, humidificador, deshumidificador</b>	Temperatura (aumento y disminución), Humedad (aumento y disminución), Ventilación	Ninguno	Eléctrica
<b>Sistema termoeléctrico, ventiladores, humidificador, deshumidificador</b>	Temperatura (aumento y disminución), Humedad (aumento y disminución), Ventilación	Ninguno	Eléctrica

Tabla 2.9 – Propuestas de solución para el Sistema de modificación de variables

### Tabla de combinación de conceptos

Una herramienta muy útil para la generación de conceptos a partir de las posibles soluciones descritas es la tabla de combinación de conceptos, la cual considera en forma sistemática las posibles combinaciones de fragmentos de solución, donde cada columna de la tabla corresponde a una de las subfunciones identificadas, mientras las soluciones propuestas para cada una de ellas se enlistan en los renglones correspondientes. Los conceptos potenciales se forman al combinar un fragmento de cada columna de la tabla.

No obstante, es importante recalcar que la tabla de combinaciones es una simple forma de hacer asociaciones forzadas entre fragmentos, para estimular el pensamiento creativo, y de ir conformando un concepto concreto del sistema sobre el cual empezar a desarrollar la solución final. En otras palabras selección de una combinación de fragmentos no lleva manera inmediata a una solución al problema general, ya que dicha combinación puede resultar imposible de desarrollar o requerir de la participación de más de una solución para lograr el resultado deseado.

<b>Suministro de energía</b>	<b>Sensado de variables</b>	<b>Procesamiento</b>	<b>Interfaz</b>	<b>Modificación de variables</b>
<i>Fuente PC</i>	Termopar, Capacitivo Analógico, Infrarrojo	Arduino UNO	LabVIEW	Aire acondicionado vehículo
<i>Fuente Laboratorio</i>	Termistor, Resistivo, Electrolítico	PIC16F887	Processing	Aire acondicionado portátil
<i>Eliminador/ Adaptador</i>	CI Analógico, Capacitivo Analógico, Infrarrojo	NI USB-DAQ6009	Microsoft Visual Studio	Calentador, ventilador, humidificador, deshumidificador
<i>Batería recargable</i>	CI Digital, Capacitivo Digital, Electrolítico	TI MSP430 Launchpad		Sistema Termoeléctrico, ventilador, humidificador, deshumidificador

Tabla 2.10 – Tabla de combinación para la generación de conceptos

Para fines prácticos, se generaron seis conceptos que cumplen con las especificaciones, cuidando que cada elemento de la Tabla 2.10 fuera tomado en cuenta por lo menos una vez. A continuación se realiza una descripción de dichos conceptos, los cuales se ilustran en las Figuras 2.5 a 2.10.

En todas las propuestas mostradas todos los elementos, en especial los sensores y actuadores, así como la ubicación de los mismos, se representan de manera generalizada. Las características finales del sistema dependerán de la opción seleccionada y se describirán más adelante en la sección de diseño de detalle.

**CONCEPTO A:**

Las propuestas de solución de este concepto incluyen: sensor de CO<sub>2</sub> del tipo infrarrojo, sensor tipo termopar para el sensado de temperatura, sensor capacitivo analógico para la humedad relativa, alimentación de voltaje a través de fuentes reguladas de valor fijo, del tipo que se usa para PC, procesamiento a través del microcontrolador PIC16F887, monitoreo y control a través de una interfaz gráfica de usuario generada en Microsoft Visual Studio y el uso de un sistema de aire acondicionado portátil para la modificación de las variables.

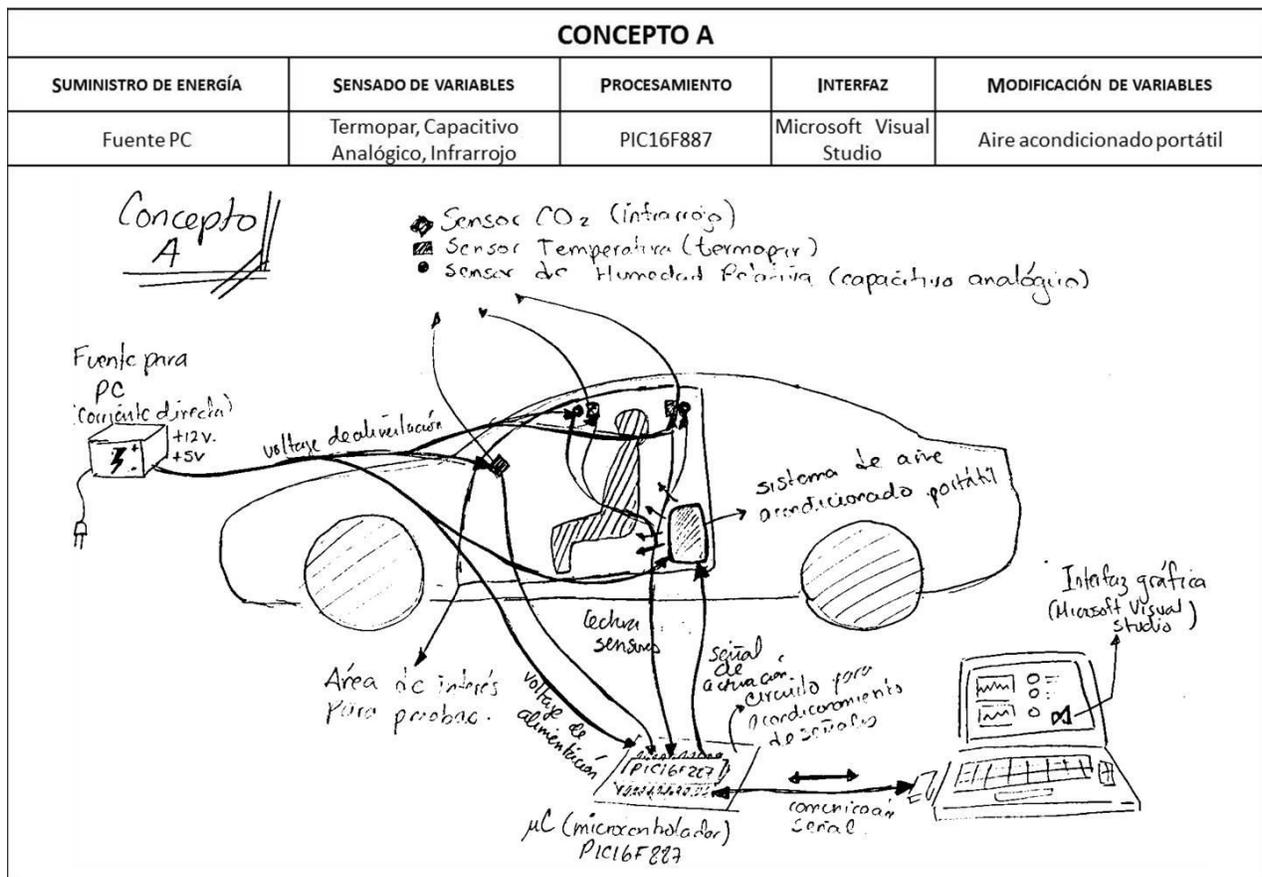


Figura 2.5 – Ilustración del concepto A

**CONCEPTO B:**

Incluye un sensor de CO<sub>2</sub> del tipo electrolítico, sensor de circuito integrado digital para el sensado de temperatura, sensor capacitivo digital para la humedad relativa, alimentación de voltaje a través de fuentes reguladas de valor fijo, del tipo que se usa para PC, procesamiento a través de la tarjeta de desarrollo Arduino UNO que cuenta con un microcontrolador ATMEGA328, monitoreo y control a través de una interfaz gráfica de usuario generada en LabVIEW y el uso de un sistema de aire compuesto por un elemento termoeléctrico, ventiladores, humidificador y deshumidificador para la modificación de las variables.

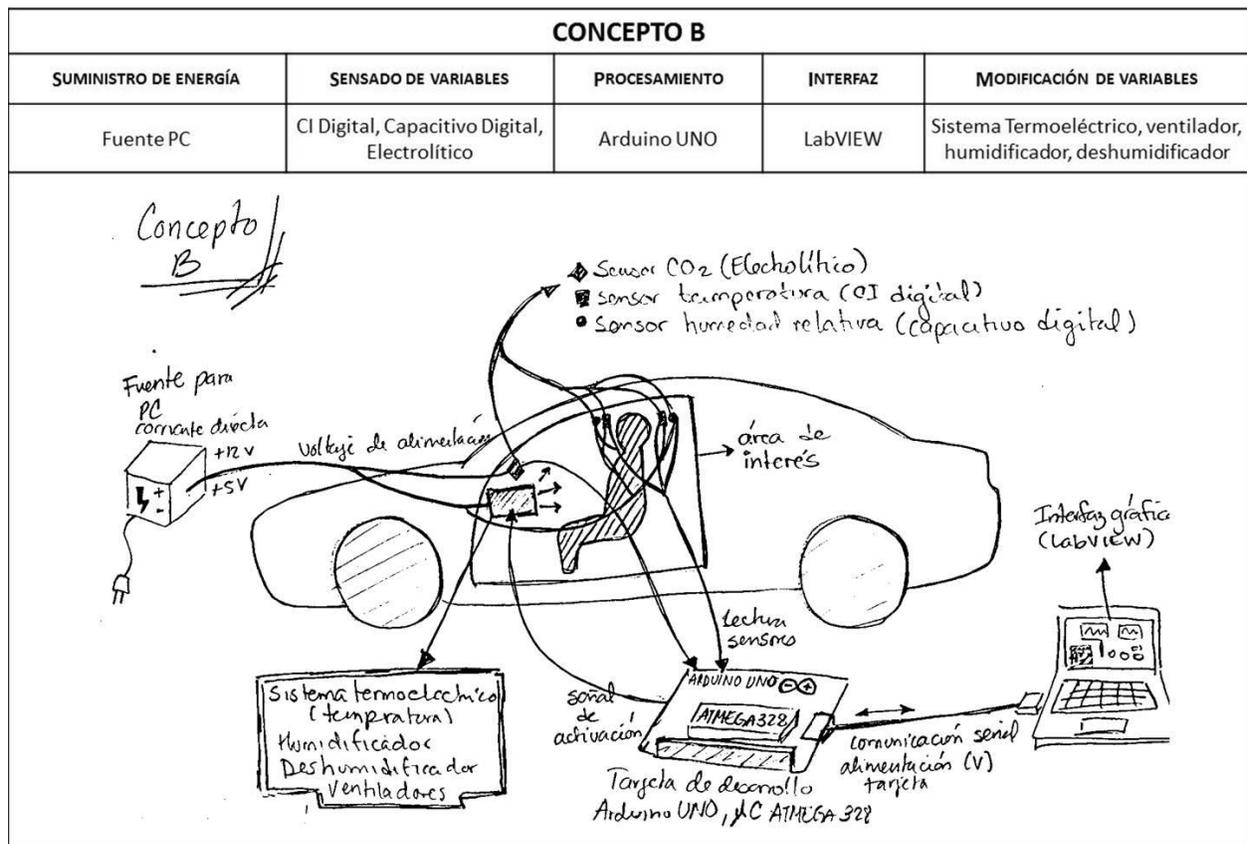


Figura 2.6 – Ilustración del concepto B

**CONCEPTO C:**

Incluye un sensor de CO<sub>2</sub> del tipo infrarrojo, sensor de circuito integrado analógico para el sensado de temperatura, sensor capacitivo analógico para la humedad relativa, alimentación de voltaje a través de una batería recargable con valor de voltaje fijo, como la batería del auto, procesamiento a través de la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments USB-DAQ6009, en conjunto con una interfaz gráfica de usuario generada en LabVIEW, así como el uso del sistema de aire acondicionado del mismo vehículo para la modificación de las variables.

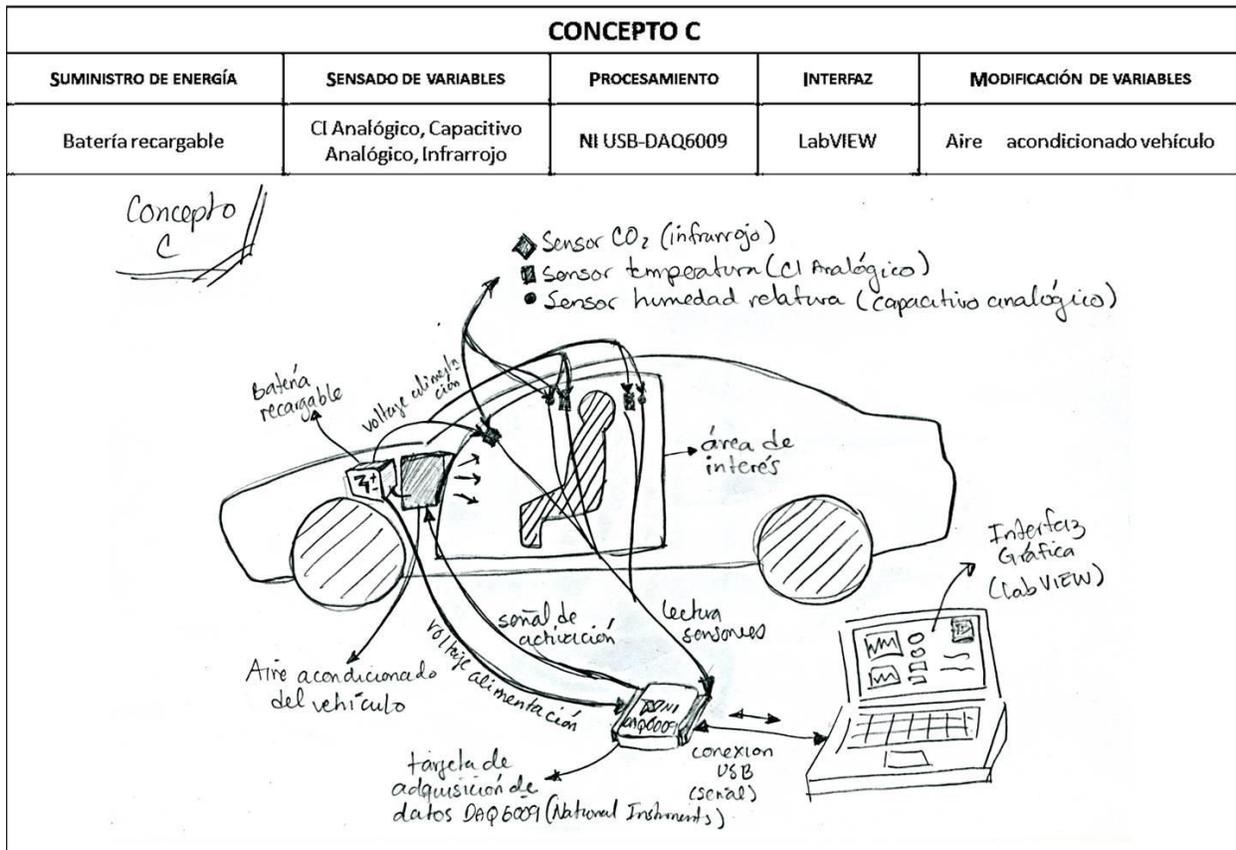


Figura 2.7 – Ilustración del concepto C

**CONCEPTO D:**

Propone: el uso de un sensor de CO<sub>2</sub> tipo electrolítico, el uso de termistores para el sensado de temperatura, sensor resistivo para la humedad relativa, alimentación de voltaje a través de fuentes reguladas de valores variables, del tipo que se usa para laboratorio, procesamiento a través de la tarjeta de desarrollo Arduino UNO (microcontrolador ATMEGA328), monitoreo y control a través de una interfaz gráfica de usuario generada con Processing y el uso de un sistema conformado por un calentador eléctrico, ventiladores, humidificador y deshumidificador para la modificación de las variables.

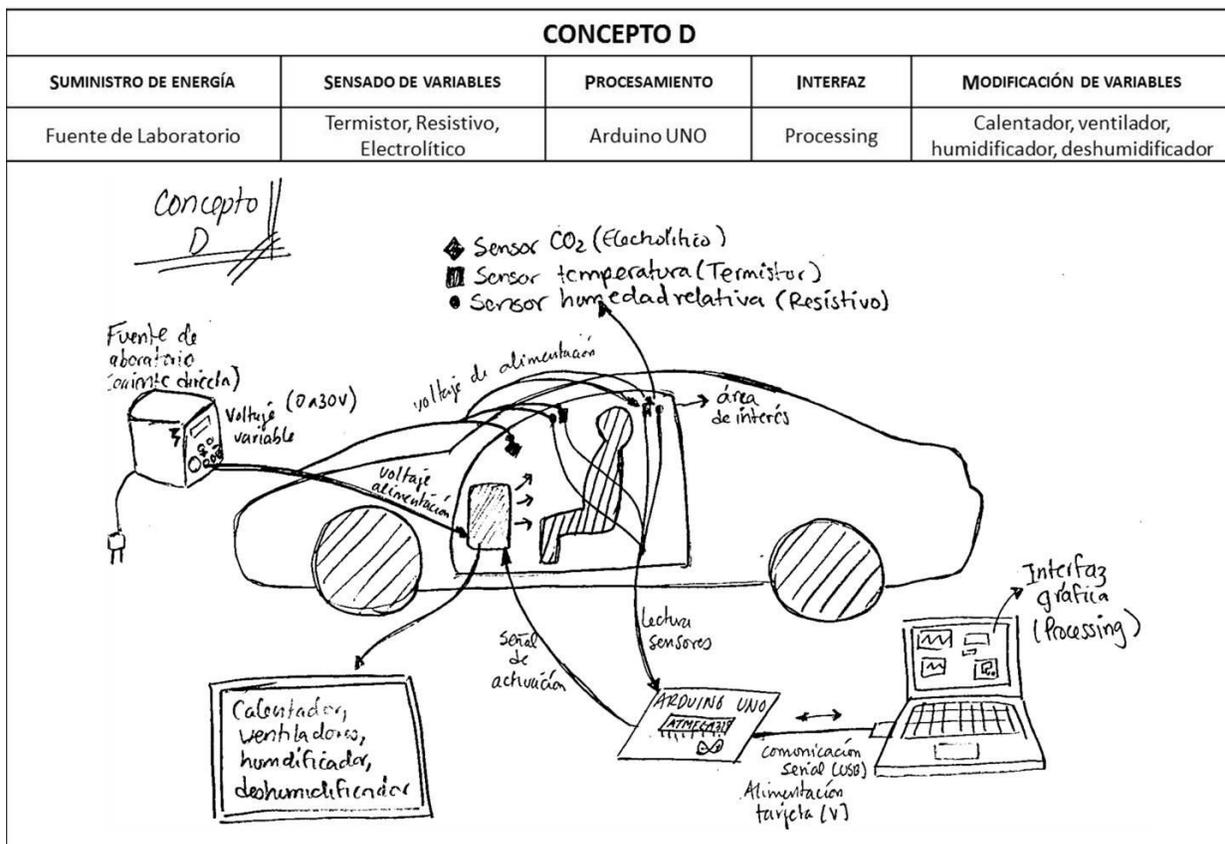


Figura 2.8 – Ilustración del concepto D

**CONCEPTO E:**

Las propuestas de solución de este concepto incluyen: sensor de CO<sub>2</sub> tipo electrolítico, sensor de circuito integrado digital para el sensado de temperatura, sensor capacitivo digital para la humedad relativa, alimentación de voltaje a través de cables eliminadores o adaptadores de voltaje de valor fijo, la utilización de la tarjeta de desarrollo de Texas Instruments MSP430 Launchpad (microcontrolador MSP430G2553), para el sistema de procesamiento, así como el monitoreo y control a través de una interfaz gráfica de usuario generada en Microsoft Visual Studio y el uso de un sistema termoeléctrico, ventiladores, humidificador y deshumidificador para la modificación de las variables.

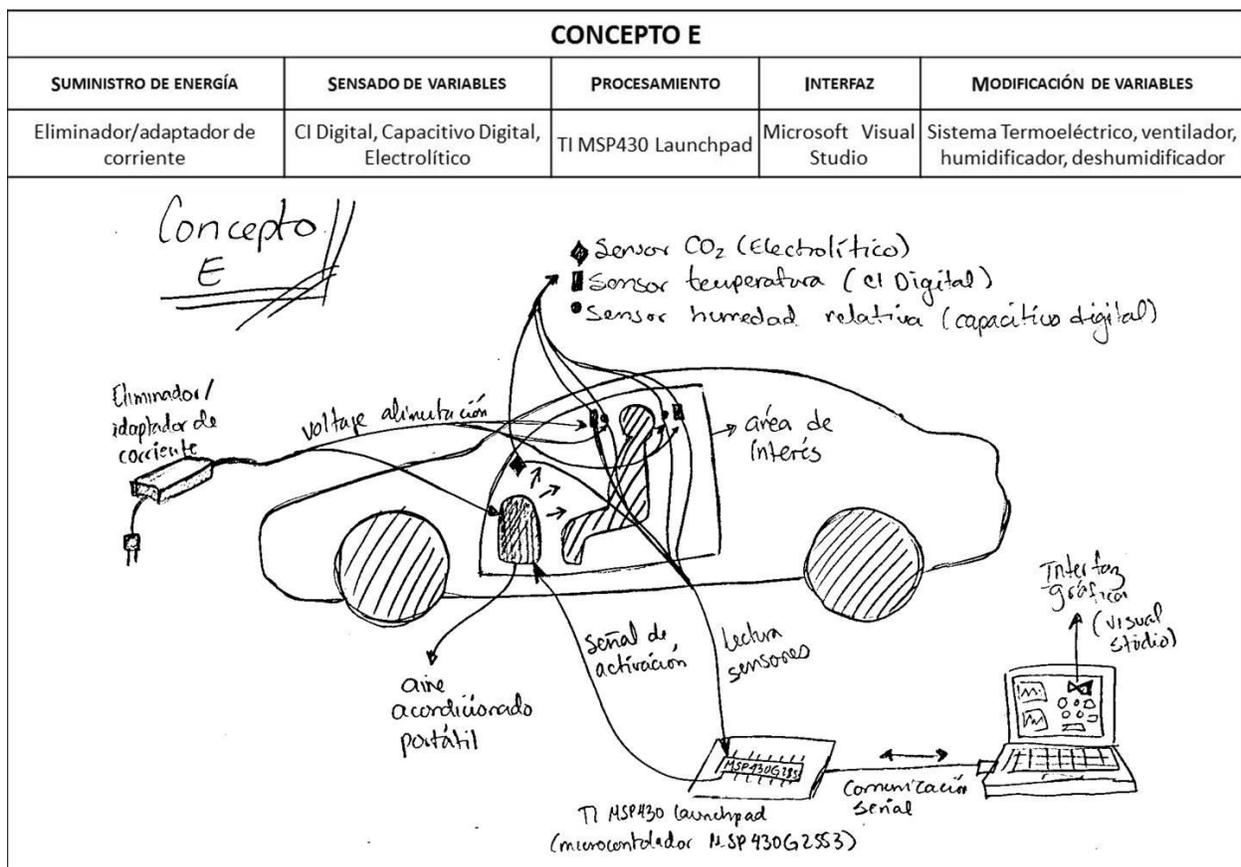


Figura 2.9 – Ilustración del concepto #

**CONCEPTO F:**

Este concepto propone: el uso de un sensor de CO<sub>2</sub> tipo infrarrojo, un sensor de circuito integrado analógico para el sensado de temperatura, sensor capacitivo analógico para la humedad relativa, alimentación de voltaje a través de fuentes reguladas de valores variables, del tipo que se usa para laboratorio, procesamiento a través del microcontrolador PIC16F887, así como el uso de una interfaz gráfica de usuario generada con Processing para el monitoreo y control, además del uso del sistema de aire acondicionado del mismo vehículo para la modificación de las variables.

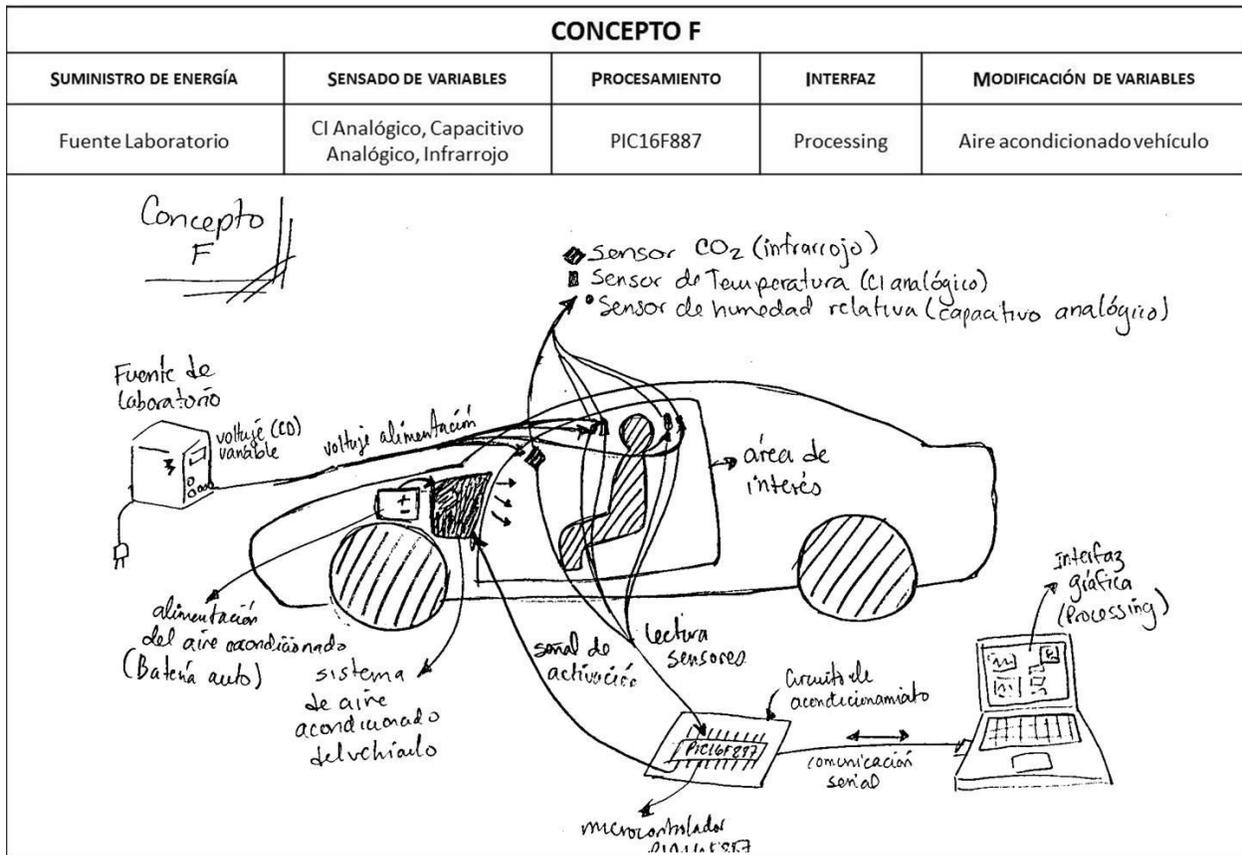


Figura 2.10 – Ilustración del concepto F

## 2.5 Selección del concepto

La selección del concepto se refiere al proceso por medio del cual se evalúan los conceptos generados anteriormente, comparando los puntos fuertes y débiles de cada concepto, con respecto a la satisfacción de las necesidades del cliente. De esta manera se busca seleccionar uno o más de estos conceptos para su posterior desarrollo como solución al problema inicial.

Durante el proceso de selección del concepto, se suelen utilizar guías visuales conocidas como *matrices de decisión*, en donde se evalúan los conceptos del producto con respecto a un conjunto de criterios de selección, que se eligen con base en las necesidades del cliente, así como en algunas otras necesidades o limitaciones en cuanto a su fabricación. Los criterios de selección en esta etapa suelen expresarse con un nivel de abstracción tal que no limite el desarrollo de la solución, pero que permita la distinción de los conceptos.

Si bien la matriz de decisión emplea un método comparativo concepto-criterio para la diferenciación de los conceptos, se puede lograr un nivel de evaluación con mayor resolución si se realiza una ponderación previa en cuanto al nivel de importancia relativa de los criterios de selección. La Tabla 2.11 muestra la lista de los criterios de selección elegidos para la evaluación de los conceptos mencionados anteriormente, así como la ponderación de su importancia, o factor de peso, representada en puntos porcentuales. Dicha ponderación se obtuvo a través de la comparación uno a uno de cada criterio y la relación con el total de puntos para el porcentaje.

CRITERIO DE SELECCIÓN		PESO (%)
<b>A</b>	Tamaño	1.887
<b>B</b>	Número de componentes	2.830
<b>C</b>	Número de interconexiones	2.830
<b>D</b>	Facilidad de instalación	4.717
<b>E</b>	Número de variables que modifica	10.377
<b>F</b>	Independencia de elementos	6.604
<b>G</b>	Facilidad de adquisición	7.547
<b>H</b>	Calibración	6.604
<b>I</b>	Componentes adicionales requeridos	5.660
<b>J</b>	Costo	8.491
<b>K</b>	Facilidad de control	13.208
<b>L</b>	Tiempo de desarrollo	6.604
<b>M</b>	Facilidad de programación	10.377
<b>N</b>	Compatibilidad entre dispositivos	2.830
<b>O</b>	Manejo de varios canales simultáneos	9.434
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>

Tabla 2.11 – Criterios de selección (ponderados)

En cuanto a la construcción de la matriz, como se puede observar en la Figura 2.11, que muestra la matriz de decisión generada para la selección del concepto, los criterios de selección, con su respectivo valor de peso (importancia) se enlistan en los renglones del lado izquierdo de la matriz, mientras que los conceptos se presentan en las columnas.

Así mismo, se presentan dos valores para cada concepto: la *evaluación sin procesar* (o *calificación*), donde se distingue el cumplimiento de cada criterio de selección en el concepto evaluado, en una escala del 1 al 5, donde 1 es el valor mínimo y 5 el máximo, y la *evaluación ponderada*, que se calcula multiplicando el valor de evaluación absoluta por el valor ponderado del criterio que se está comparando. Finalmente, se obtiene la evaluación total para cada concepto, a través de la suma de las evaluaciones ponderadas.

De los resultados obtenidos a través de la matriz de decisión, se observa que el concepto que obtuvo la mayor calificación, lo que quiere decir que es el que responde de mejor manera a los criterios de selección, es el Concepto B. Esto quiere decir que el desarrollo del sistema se basará en las propuestas de solución que éste concepto propone. No obstante, como se mencionó anteriormente, el desarrollo de esta solución puede encontrarse con conflictos técnicos que puedan o requieran de la combinación o sustitución de alguna de las soluciones de otro u otros conceptos, con el fin de obtener una mejor solución.

Criterio de selección	Peso (%)	CONCEPTO A		CONCEPTO B		CONCEPTO C		CONCEPTO D		CONCEPTO E		CONCEPTO F	
		Calificación	Evaluación Ponderada										
A	1.887	4	0.075	3	0.057	4	0.075	3	0.057	3	0.057	4	0.075
B	2.83	4	0.113	3	0.085	5	0.142	3	0.085	4	0.113	4	0.113
C	2.83	3	0.085	2	0.057	3	0.085	2	0.057	3	0.085	3	0.085
D	4.717	4	0.189	4	0.189	4	0.189	4	0.189	4	0.189	4	0.189
E	10.377	3	0.311	5	0.519	3	0.311	5	0.519	3	0.311	3	0.311
F	6.604	3	0.198	4	0.264	3	0.198	3	0.198	3	0.198	3	0.198
G	7.547	3	0.226	4	0.302	1	0.075	4	0.302	3	0.226	1	0.075
H	6.604	4	0.264	3	0.198	3	0.198	2	0.132	3	0.198	3	0.198
I	5.66	2	0.113	4	0.226	3	0.170	4	0.226	3	0.17	3	0.17
J	8.491	2	0.17	3	0.255	2	0.170	2	0.17	3	0.255	2	0.17
K	13.208	3	0.396	4	0.528	1	0.132	3	0.396	3	0.396	1	0.132
L	6.604	3	0.198	3	0.198	4	0.264	4	0.264	3	0.198	4	0.264
M	10.377	2	0.208	3	0.311	2	0.208	3	0.311	2	0.208	2	0.208
N	2.83	2	0.057	3	0.085	2	0.057	3	0.085	3	0.085	2	0.057
O	9.434	4	0.377	5	0.472	4	0.377	4	0.377	4	0.377	4	0.377
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>46</b>	<b>2.981</b>	<b>53</b>	<b>3.745</b>	<b>44</b>	<b>2.651</b>	<b>49</b>	<b>3.368</b>	<b>47</b>	<b>3.066</b>	<b>43</b>	<b>2.623</b>
<b>Lugar</b>		<b>4</b>		<b>1</b>		<b>5</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>6</b>	

Figura 2.11 – Matriz de decisión (evaluación ponderada)

# **CAPÍTULO 3**

# CAPÍTULO 3- DISEÑO DE DETALLE

## 3.1 Arquitectura del sistema

Un producto puede considerarse en términos de sus *elementos funcionales*, aquellas operaciones y transformaciones individuales que contribuyen al rendimiento general del sistema, y sus *elementos físicos*, es decir, todas las partes, componentes y subconjuntos que ponen en práctica las funciones del producto. Estos elementos físicos se organizan de manera específica en varios elementos de construcción más grandes, llamados *trozos* o *secciones* [53].

La *arquitectura* de un producto es pues aquel esquema por el cual se acomodan los elementos funcionales en secciones físicas y por medio del cual interactúan dichas secciones, es decir, la asignación de los elementos funcionales a elementos físicos, con el fin de definir aquellos elementos de construcción del producto en términos de lo que hacen y de cuáles son sus interfaces (medios de interacción) con el resto del dispositivo. Es por eso que la arquitectura del sistema es considerado el foco inicial de la fase de diseño de desarrollo a nivel detallado del sistema, o diseño de detalle.

En la sección anterior del presente trabajo se hizo una descripción de los elementos funcionales del sistema propuesto, a través de la identificación de los subsistemas que lo conforman así como de las funciones que cada uno de ellos desempeña, siendo el árbol de medios y funciones (Figura 2.4) una primera representación esquemática de la arquitectura del sistema. Dichos elementos funcionales se redujeron a tecnologías específicas, componentes o principios físicos de trabajo, de manera generalizada, durante la generación y selección del concepto.

Como se observa en la Figura 3.1, el sistema propuesto cuenta con una arquitectura modular, en la cual los elementos funcionales se implementan de manera individual a través de los elementos físicos que conforman el concepto elegido, formando secciones específicas para el sistema, cuyas interacciones están bien definidas a través de distintos tipos de interfaz, de manera que las diversas secciones no se pueden intercambiar. Este tipo de arquitectura permite que dichas secciones se diseñen de manera independiente, por lo que se pueden generar cambios de diseño en una de las secciones sin requerir cambios en las demás para lograr el buen funcionamiento del producto.

A continuación se presenta la descripción del desarrollo de las secciones del sistema, a través de los componentes que las conforman, así como de su interacción con las demás secciones, en la implementación del modelo funcional.

Para fines prácticos, las distintas secciones del sistema reciben el mismo nombre de los subsistemas generados en la sección de diseño conceptual.

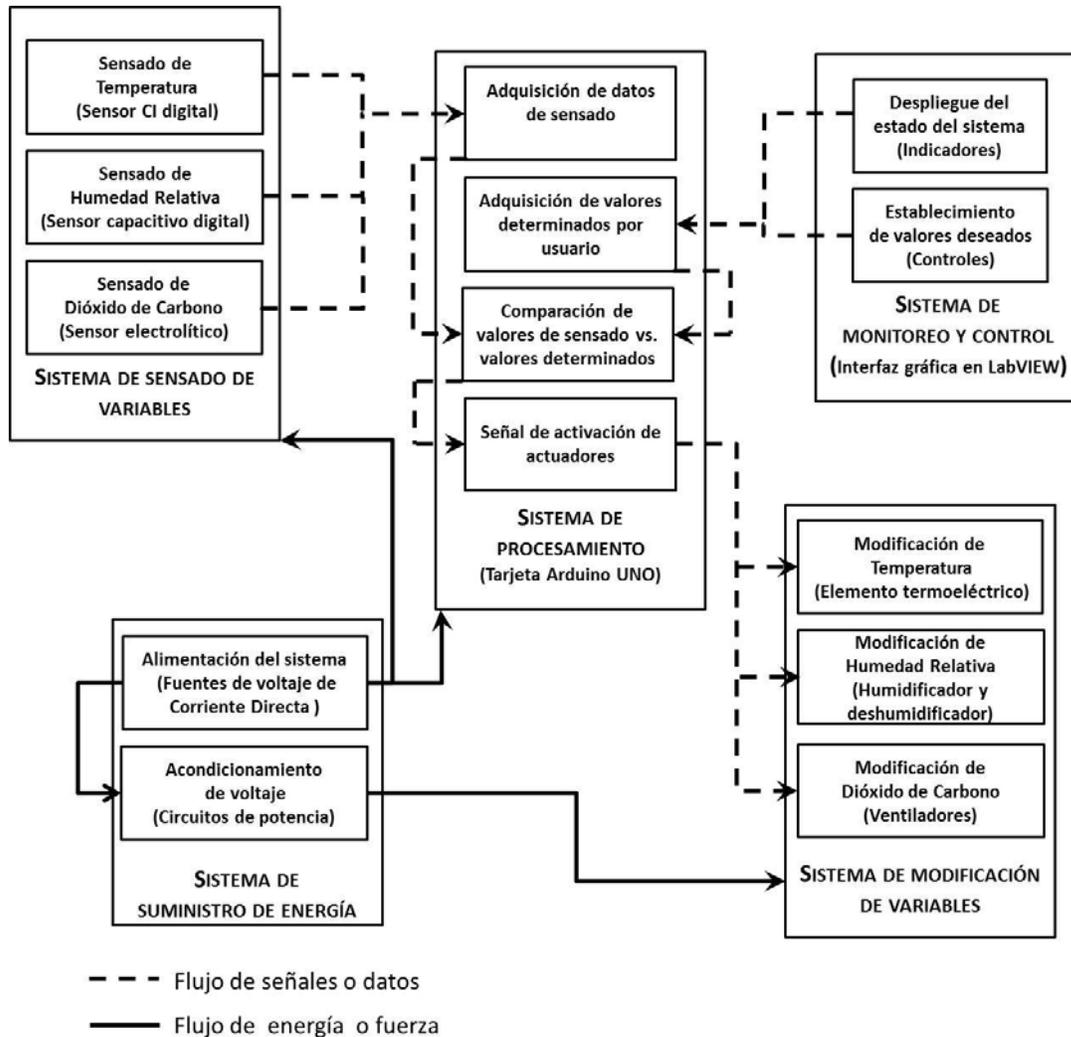


Figura 3.1 – Arquitectura del sistema

## 3.2 Implementación del sistema

### *Sistema de sensado de variables*

Para la medición tanto de temperatura como de humedad relativa, se eligió el sensor RHT03, también conocido como DHT22, cuyas características técnicas, obtenidas de su hoja de especificaciones [55], se enlistan en la Tabla 3.1.

Este sensor está conformado básicamente por un sensor capacitivo para la medición de humedad relativa y de un termistor para la temperatura, ambos conectados a un pequeño chip (circuito integrado) que realiza la conversión analógico-digital de los datos obtenidos, de manera que se obtiene a la salida una señal digital calibrada que refleja los valores de temperatura y humedad relativa.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje de alimentación	3.3 a 6 [V] DC
Corriente	1 a 1.5 [mA]
Rango de operación	0 a 100 [%HR], -40 a +80 [°C]
Velocidad de muestreo	0.5 [Hz] máx. cada 2 [s]
Precisión	±2 a 5 [%HR], ±0.5 [°C]
Resolución (Sensibilidad)	0.1 [%HR], 0.1 [°C]
Repetitividad	±1 [%HR], ±0.2 [°C]
Histéresis de humedad	±0.3 [%HR]
Estabilidad a largo plazo	±0.5 [%HR]/año

Tabla 3.1 – Características del sensor RHT03 [55]

Como se observa en el diagrama de conexión del sensor, mostrado en la Figura 3.2, al obtener la información del sensor a través de una señal digital, la conexión se realiza directamente desde el pin 2 del sensor hacia cualquier entrada digital del microcontrolador, sin necesidad de ningún otro componente o circuito para la medición, más que una resistencia de 10[KΩ] en configuración de *pull-up*, para ayudar a la transmisión de datos, como se explica más adelante. El pin 1 corresponde a la alimentación del sensor, el cual debe estar encendido para poder iniciar la transmisión de datos. El pin 4 es la conexión a tierra y el pin 3 puede ser ignorado (no conectado) o bien conectarse a tierra.

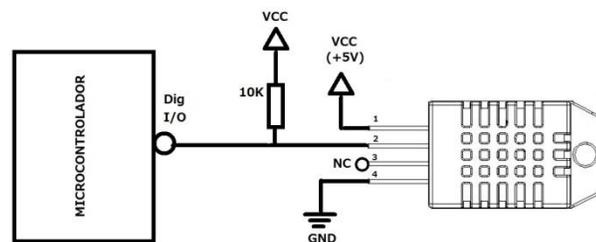


Figura 3.2 – Diagrama de conexión del sensor RHT03

El sensor RHT03 ocupa un protocolo de comunicación llamado MaxDetect- 1wire bus, que es una señal digital de doble dirección (envío y recepción) a través de único cable. Siempre que se aplica un voltaje al pin 1, el sensor se encuentra activo, pero en estado de reposo, y no inicia la transmisión de datos a menos de que reciba la señal de activación de parte del microcontrolador.

Como se ilustra en el proceso completo de la transmisión de datos por medio de la comunicación 1-wire (Figura 3.3), la señal desde el controlador se encuentra siempre en estado alto, por lo que, para enviar la señal de activación, el controlador debe primero llevar a estado bajo el pin de datos por un tiempo aproximado de 10 [ms], para que el sensor pueda detectarla, pasando después a un estado alto, durante unos 20 a 40 [μs]. El sensor envía entonces su respuesta llevando la señal a un estado bajo durante unos 80 [μs] y luego a estado alto durante otros 80 [μs], después del cual inicia la transmisión de datos.

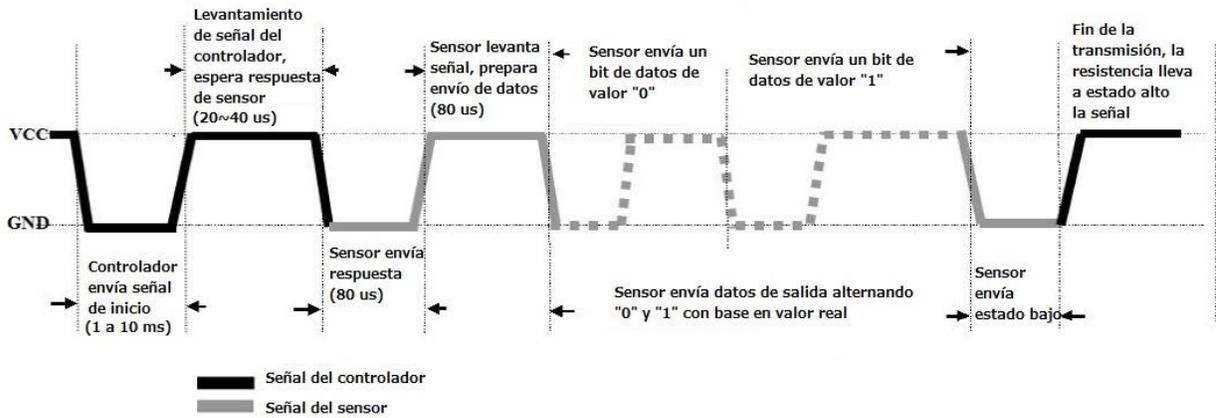


Figura 3.3 – Ilustración del protocolo de comunicación MAXDectect-1wire [55]

La señal de salida del sensor consiste en la transmisión de 40 bits de datos, de los cuales 16 corresponden al valor  $y$  y 16 al valor de humedad relativa, registrados por el termistor y el higrómetro capacitivo respectivamente. Dichos datos se componen por una parte entera y un decimal, los cuales se identifican a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Datos} = 8 \text{ bits parte entera}_{HR} + 8 \text{ bits parte decimal}_{HR} + 8 \text{ bits parte entera}_T + 8 \text{ bits parte decimal}_T + 8 \text{ bits checksum} \quad (1)$$

La suma de verificación, (checksum) a la que corresponden los últimos 8 bits de la señal, se emplea para detectar errores que se hayan podido generar durante la transmisión. Cuando los datos se transmitieron correctamente, el valor de la suma debe ser igual a la suma de los bits de temperatura y los de humedad relativa.

Si bien la conexión del sensor, y por lo tanto su manejo, resultan muy sencillos, se requiere de una cuidadosa sincronización para lograr la recepción de datos, pues se deben esperar por lo menos 2 segundos, para sobrepasar el tiempo de inestabilidad del sensor, antes de solicitar una lectura. Asimismo, durante la transmisión de datos, el envío de cada bit inicia con un estado bajo de 50  $\mu\text{s}$  de duración, seguido por una etapa de estado alto, cuya duración determina si es un "0" (26~28  $\mu\text{s}$ ) o un "1" (70  $\mu\text{s}$ ), como se ilustra en la Figura 3.4.

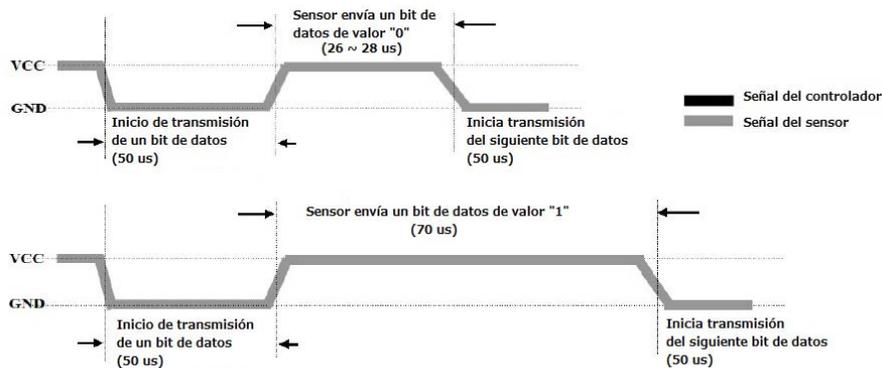


Figura 3.4 – Identificación del tipo de bit de datos [55]

En cuanto a la medición de la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), se eligió el módulo de sensado SEN-000007 de Sanbox Electronics, el cual contiene como elemento principal al sensor MG-811, cuyas características, obtenidas de la hoja de especificaciones [56], se enlistan en la tabla 3.2.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje de calentamiento	6.0±0.1V
Resistencia del calentador	~30.0 Ohm
Corriente de calentamiento	~200mA
Energía disipada (calor)	~1200mW
Temperatura de operación	-20 – 50°C
Voltaje de salida	100-600mV

Tabla 3.2 – Características del sensor MG-811 [56]

El sensor MG-811 es un sensor de óxido de metal, compuesto principalmente por dos electrodos de oro y celdas electrolíticas sólidas (Au|NASICON|Carbonato|Au), conectores de platino, y un elemento resistivo (calentador) para el calentamiento del sensor. Su principio de operación es básicamente el de cualquier sensor de óxido de metal: al aplicarse un voltaje al sensor, éste se calienta, causando reacciones de reducción y oxidación en el cátodo y ánodo, respectivamente, sobre la superficie de la película de metal, cambiando la conductividad del semiconductor conforme a la presencia de CO<sub>2</sub>.

La fuerza electromotriz (FEM), o potencial eléctrico, producido durante la reacción, se asocia a la concentración de dióxido de carbono con respecto a la ecuación de Nernst:

$$FEM = E_c + \frac{RT}{2F} * \ln P_{CO_2} \quad (2)$$

Dónde  $E_c$  es el volumen constante,  $R$  es la constante de los gases,  $T$  es la temperatura absoluta en Kelvin,  $F$  es la constante de Faraday y  $P_{CO_2}$  es la presión parcial del CO<sub>2</sub>.

Dicha fuerza electromotriz produce un voltaje inversamente proporcional a la concentración de dióxido de carbono, siendo lineal a los valores logarítmicos de concentración de dióxido de carbono, como se puede observar en la Figura 3.5, que ilustra la curva de respuesta del sensor ante distintas concentraciones de CO<sub>2</sub> de acuerdo al fabricante [57].

Si bien, el sensor muestra gran sensibilidad ante la presencia del dióxido de carbono, la señal de salida en el rango de medición del sensor se limita a una variación de entre 30 y 50 [mV], por lo que es necesaria una amplificación de dicha señal para poder registrar las variaciones en la concentración.

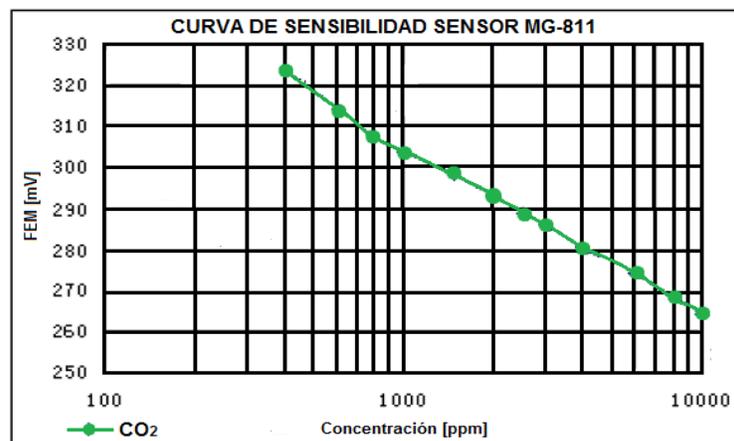


Figura 3.5 – Curva de respuesta del sensor MG-811 (@28°C, 65%HR) [57]

La hoja de especificaciones del sensor indica también que se requiere un amplificador con una impedancia con valor entre 100 y 1000 [GΩ], además de un voltaje de alimentación en el elemento de calefacción de 6[V] y 200 [mA], para garantizar su estabilidad.

El módulo de sensado SEN-000007 adapta el comportamiento del sensor MG-811 con los requerimientos de voltaje de impedancia necesarios para su conexión con la tarjeta Arduino, incorporando dos circuitos de acondicionamiento: uno para el control y regulación del voltaje para el calentamiento del sensor y otro para la amplificación y filtrado de la señal de salida.

Asimismo, el módulo cuenta con una entrada de alimentación para el circuito de control del voltaje de calentamiento y un conector de cuatro cables, que se conectan directamente a la tarjeta Arduino: *VCC* (+5V), voltaje de alimentación para el acondicionamiento de la señal, *V<sub>OUT</sub>*, voltaje de salida del sensor que se conecta a una entrada analógica del Arduino, *BOOL*, una señal digital de comparación con respecto a un umbral establecido (no se ocupa en el presente trabajo), y *GND*, conexión a tierra. Lo anterior se ilustra en el diagrama de la Figura 3.6.

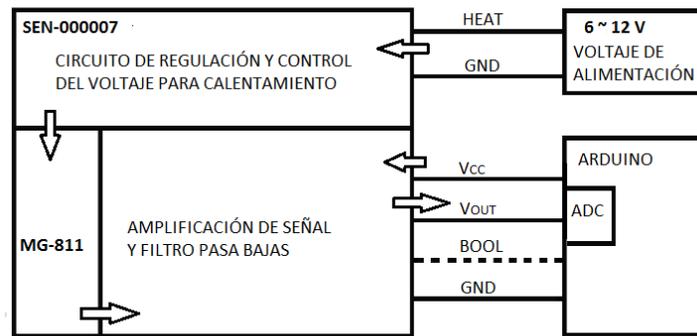


Tabla 3.6 – Esquema general del módulo SEN-000007 [56]

El circuito de regulación y control para el voltaje de calentamiento se trata de una fuente conmutada de voltaje, es decir, un convertidor o transformador de voltaje cuyo valor de salida es controlado a través de la conmutación activa en altas frecuencias de las etapas de saturación y corte de transistores, a manera de *switch*, a diferencia de las fuentes reguladas que utilizan todo el tiempo a los transistores polarizados en su región activa. En el caso del módulo empleado, la fuente conmutada es del tipo *step-down* (convertidor Buck), trabajando como un transformador reductor, es decir, el voltaje de salida es de menor valor al voltaje de entrada.

La Figura 3.7a muestra la configuración general de un convertidor Buck, donde se observan los dos ciclos de trabajo (interruptor abierto y cerrado) del circuito, mientras que la Figura 3.7b muestra el diagrama de conexión del circuito implementado en el módulo SEN-000007. Como se observa en la imagen, el convertidor empleado es el MP2359, cuyo valor de voltaje de realimentación es de 0.81 [V], de manera que el voltaje de salida se obtiene a través de la ecuación (3)[58]. La ecuación (4) muestra la sustitución en (3) de los valores de los elementos del circuito.

$$V_{OUT} = 0.81 * \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (3)$$

$$V_{OUT} = 0.81 * \left(1 + \frac{10.0}{1.58}\right) = 6 [V] \quad (4)$$

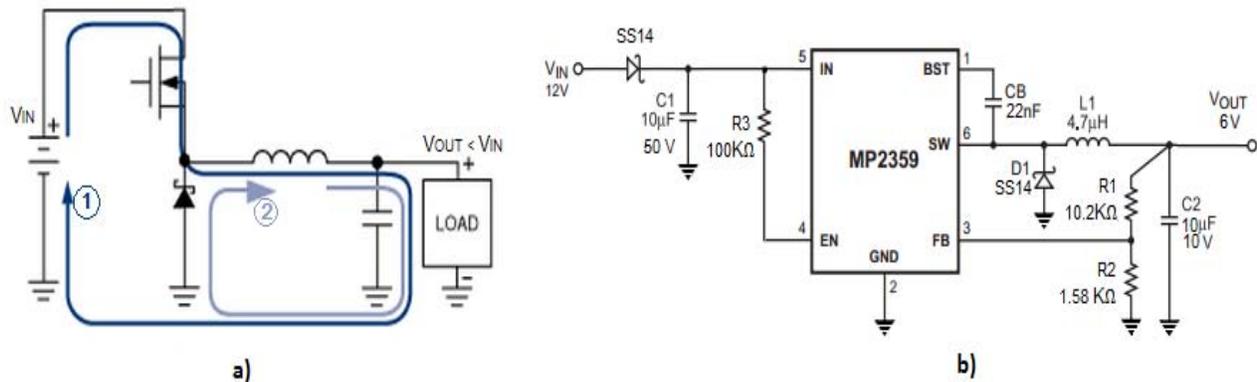


Figura 3.7 – a) Convertidor Buck (step-down), b) Convertidor step-down del SEN-000007 [58]

Cuando el transistor (MOSFET) del circuito se encuentra cerrado, la corriente fluye desde la fuente de voltaje, siguiendo el ciclo 1, de manera que una parte va a la carga y la otra se almacena en el capacitor. Debido a la polaridad de los extremos del inductor, el diodo está polarizado en inversa por lo que no conduce. Cuando el interruptor se abre, la polaridad del inductor cambia, polarizando directamente el diodo, de manera que se evitan voltajes altos en el inductor, además de que se permite el paso de corriente siguiendo el camino mostrado en el ciclo 2. En esta etapa, la corriente que llega a la carga es suministrada por el inductor y el capacitor.

El voltaje de salida es regulado mediante la manipulación del tiempo de conducción del elemento de control, a través de una señal de onda con ancho de pulso modulado (PWM), generado con ayuda de la combinación de amplificadores de error, osciladores, comparadores y demás elementos contenidos en el convertidor MP2359.

Como se mencionó anteriormente, el módulo SEN-000007 cuenta con otro circuito, para la amplificación de la señal adquirida desde el sensor MG-811. La Figura 3.8a muestra el diagrama de conexión general del sensor con un amplificador, mientras que la Figura 3.8b muestra el diagrama de conexión del circuito de amplificación empleado en el módulo.

Dicho circuito emplea un amplificador operacional LMC662, conectado en configuración de amplificador no inversor, cuya ganancia se determina a través de la sustitución de los valores de los elementos del circuito en la ecuación (5), como se muestra en la ecuación (6).

$$V_{OUT} = V_{IN} * \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) \quad (5)$$

$$V_{OUT} = V_{IN} * \left(1 + \frac{7.5}{1}\right) = V_{IN} * 8.5 \quad (6)$$

Además de la configuración de amplificación, el circuito incluye un filtro pasa bajas, formado por el capacitor C1 (100[nF]) y la resistencia R16 (1[KΩ]), empleado para filtrar el ruido de alta frecuencia.

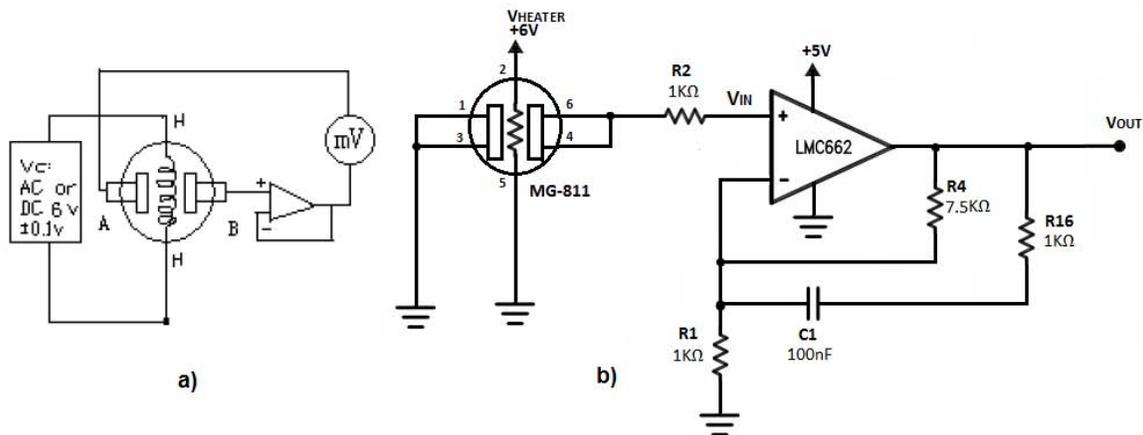


Figura 3.8 – a) Diagrama de conexión sensor MG-811 [57], b) Circuito de amplificación y filtrado del SEN-000007

A pesar de que el módulo tiene un valor de ganancia de amplificación con valor fijo, entregando un voltaje de salida de valor entre 2.5 y 5 [v], correspondientes a las concentraciones entre 400 y 10000 [ppm], debido a las variaciones que se pueden presentar de sensor a sensor en cuanto a los valores de reacción, es necesario realizar una calibración para obtener la función del comportamiento del sensor. En el caso del presente trabajo, se realizaron ocho pruebas, tomando en cuenta un tiempo de dos horas para el calentamiento del sensor, antes de la realización de cada prueba.

Dichas pruebas consistieron en el registro de los valores de voltaje del sensor correspondientes a distintas concentraciones de dióxido de carbono, en un rango de entre 450 [ppm] (aproximadamente el valor de la concentración en aire ambiental) y 2000 [ppm], debido a que es el rango de interés para fines del sistema propuesto. Dichas concentraciones fueron conocidas con ayuda de un monitor de CO<sub>2</sub> digital TWA STEL.

Como se aprecia en la Figura 3.9, que muestra los resultados obtenidos en las ocho pruebas, el si bien los valores de voltaje obtenidos presentan algunas variaciones, el comportamiento del sensor presenta una estabilidad aceptable. Asimismo, al obtener los coeficientes de correlación lineal entre el voltaje medido y la concentración de dióxido de carbono, se obtuvieron valores muy cercanos a 1, siendo 0.941 y 0.992 el mínimo y el máximo, respectivamente, comprobando así la linealidad de la respuesta del sensor, dentro del rango determinado.

Si bien los valores de desviación estándar obtenidos de los resultados de las pruebas no son de valor despreciable, en la mayoría de los casos se encontraron valores menores al 20% de dispersión con respecto al valor promedio, por lo que la ecuación obtenida a través del ajuste lineal de la curva del valor promedio, mostrada en la Figura 39b, se tomó como la ecuación de conversión para la obtención de las lecturas en valores de concentración de dióxido de carbono, como se expresa en las ecuaciones 7 y 8, al contar con una precisión aceptable para los fines del presente proyecto.

$$V_s = -0.0003C_{CO_2} + 3.9561 \quad (7)$$

$$C_{CO_2} = \frac{3.9561 - V_s}{0.0003} \quad (8)$$

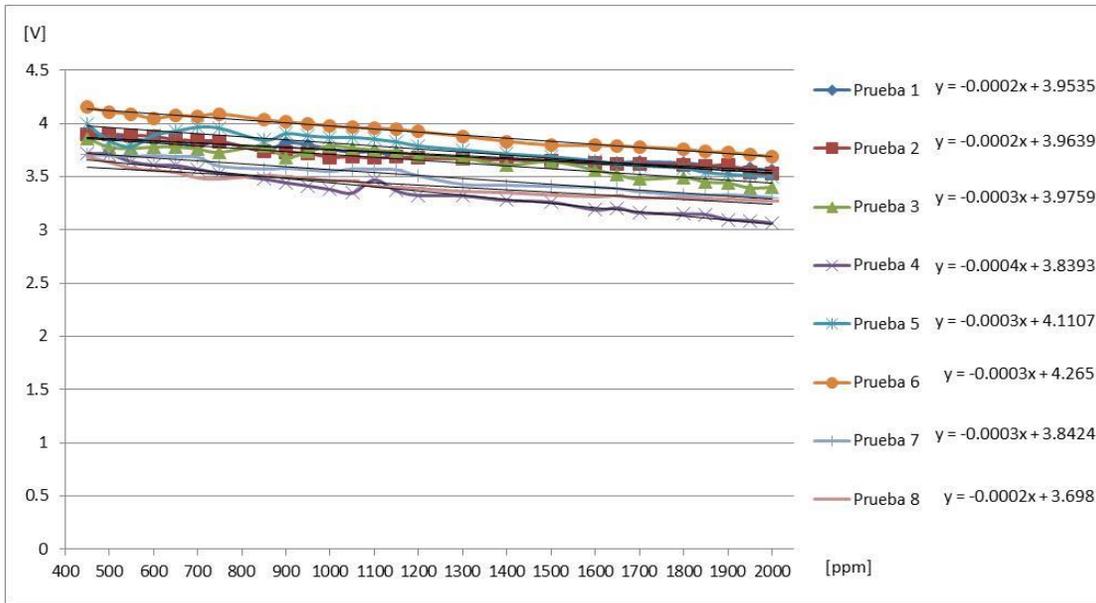


Figura 3.9 – Curvas de comportamiento del sensor de CO<sub>2</sub> con sus regresiones lineales

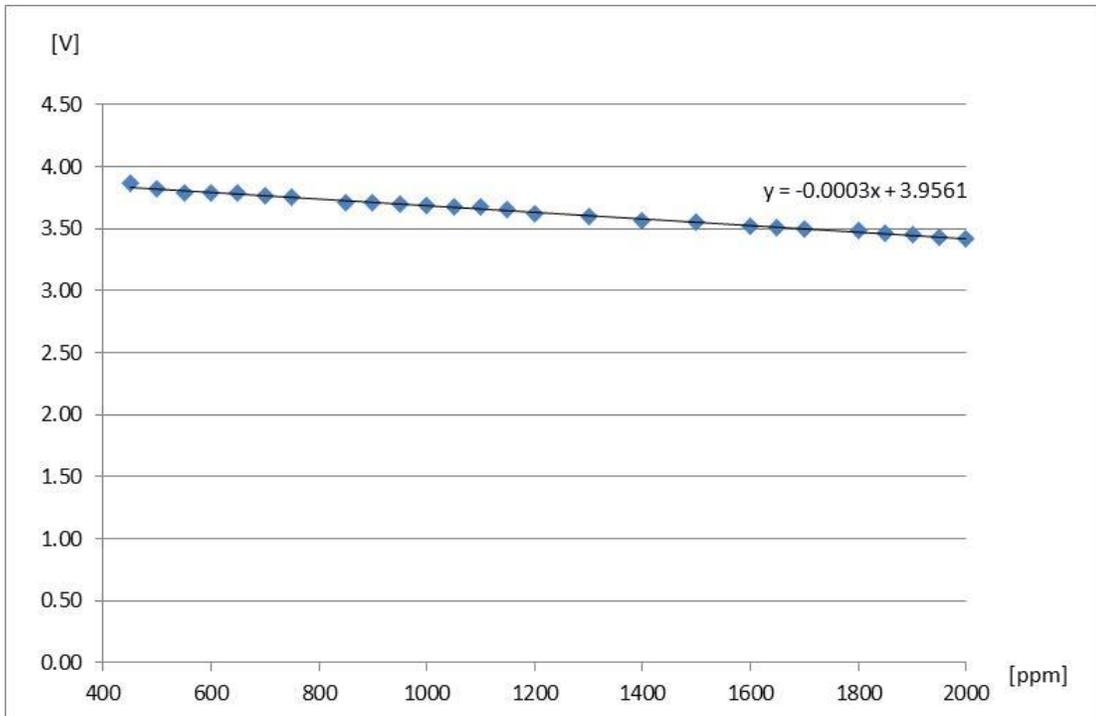


Figura 3.10 – Curva de comportamiento promedio del sensor de CO<sub>2</sub> y su ajuste lineal

## Sistema de procesamiento

El sistema de procesamiento es el punto de unión entre los demás sistemas, ya que se encarga de recibir la señal de los sensores, así como los valores deseados para el control de las variables (establecidos por el usuario), además de contener las instrucciones para la evaluación del estado de las variables, siendo responsable también de enviar tanto la información para la activación de los elementos encargados de modificar las variables del ambiente. Para este sistema, se eligió la tarjeta electrónica Arduino UNO, cuyas características se enlistan en la Tabla 3.3.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de operación	+5[V]
Entradas y salidas	14 I/O digitales (6 con salida PWM) 6 entradas analógicas
Corriente de salida	40[mA]/ salida digital
Memoria	Flash: 32[KB] (0.5[KB] para bootloader)SRAM: 2 [KB] EEPROM: 1 [KB]
Velocidad de reloj (oscilador)	16 [MHz]

Tabla 3.3 – Características de la tarjeta Arduino UNO [59]

Una de las principales ventajas de usar la tarjeta de desarrollo Arduino UNO es que reemplaza la conexión para comunicación serial por RS-232 y ocupa un solo cable de conexión USB tanto para la comunicación serial entre el puerto de la computadora y el microprocesador en la tarjeta, como para la alimentación de voltaje regulado de 5[V] requerido.

Como otra de las características de la tarjeta, cada pin de salida o entrada (I/O) digital puede suministrar hasta 40 [mA], lo cual es suficiente para interactuar con la mayoría de elementos electrónicos externos, así como encender algunos LED. Sin embargo, esta corriente no es suficiente para manejar ni siquiera pequeños motores eléctricos, ventiladores o solenoides, por lo que se requieren etapas de potencia para la activación de los actuadores, como se describe más adelante en la sección correspondiente al sistema de suministro de energía.

La programación de la tarjeta de Arduino se lleva a cabo a través de una aplicación de software o entorno de desarrollo integrado (integrated development environment, IDE), conocido también como Arduino IDE, que provee un editor de código fuente, herramientas para compilación y depuración, jerarquización de clases y objetos, y otros elementos necesarios para escribir los programas, o sketches, compilarlos y cargarlos en una variedad de tarjetas compatibles con Arduino [60].

Este software, registrado bajo la licencia pública general (GPL v.2), es una colección de diferentes paquetes de software libres y código abierto a modificaciones y optimizaciones por parte tanto de los desarrolladores de programas como los mismos usuarios de Arduino alrededor del mundo, por lo que existe un amplio conjunto de bibliotecas que se pueden incluir para extender las capacidades de las funciones incorporadas, o simplificar la programación enfocada a dispositivos particulares, como en el caso del presente trabajo, donde se ocupó una librería existente para el sensor de temperatura y humedad RTH03 (o DHT22), que realiza la adquisición de la señal digital descrita anteriormente, a través de funciones simples, adaptadas al comportamiento de este sensor en particular.

Las funciones de las que se encarga el sistema de procesamiento se llevan a cabo a través de las instrucciones escritas en el programa que se graba en el microcontrolador de la tarjeta Arduino. El código fuente del programa generado para el sistema de procesamiento se anexa en el APÉNDICE B.

Las Figuras 3.11 a 3.14 muestran los diagramas de flujo, es decir, las descripciones secuenciales de las actividades a realizar, incluyendo la toma de decisiones (condiciones) e ingreso de datos, que se emplearon para generar el programa. Como se observa en las imágenes, el programa se basa principalmente en cuatro rutinas o procesos: el establecimiento de los valores límite, el control de la temperatura, el control de la humedad relativa y el control de la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

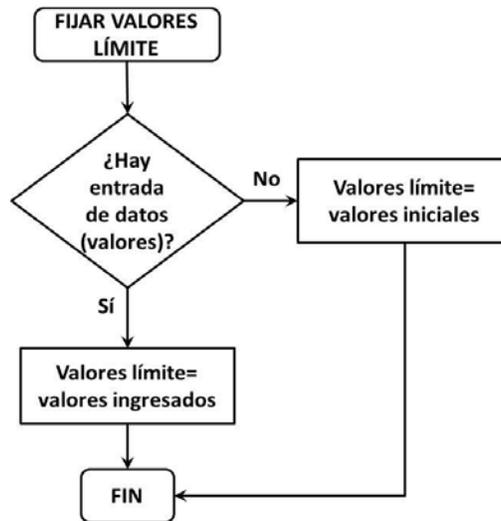


Figura 3.11 – Diagrama del proceso “Establecer valores límite”

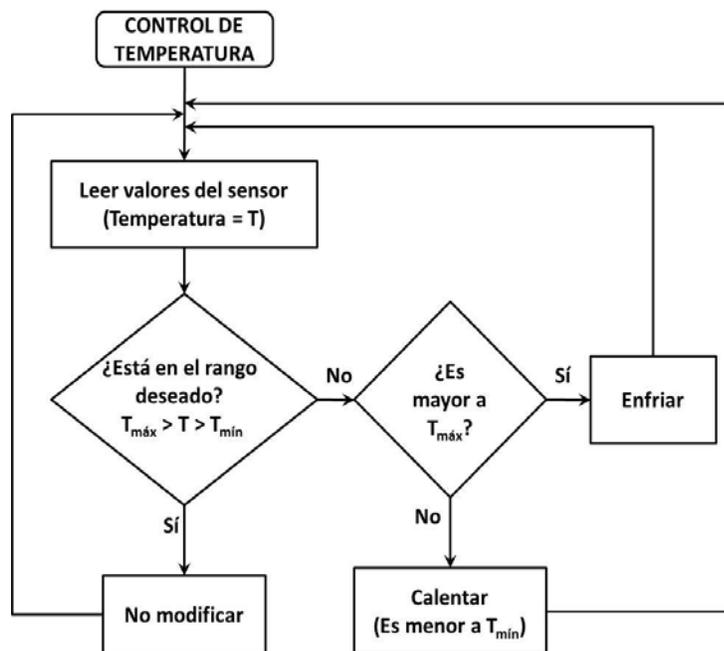


Figura 3.12 – Diagrama del proceso “Control de temperatura”

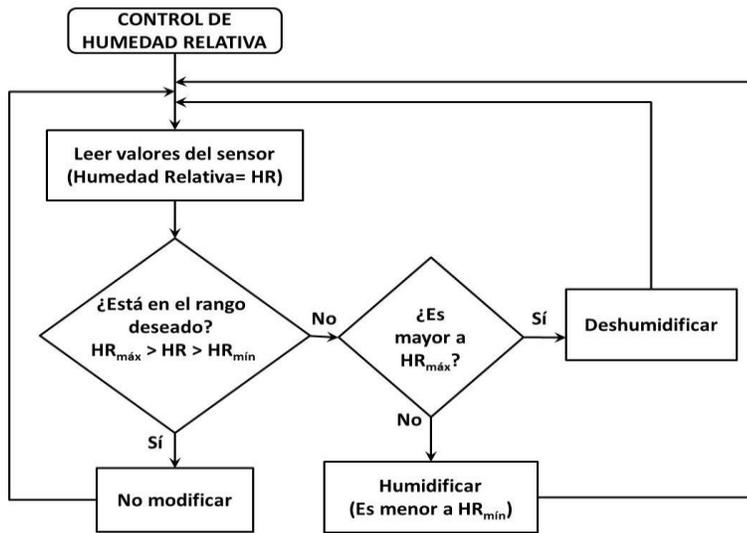


Figura 3.13 – Diagrama del proceso “Control de humedad relativa”

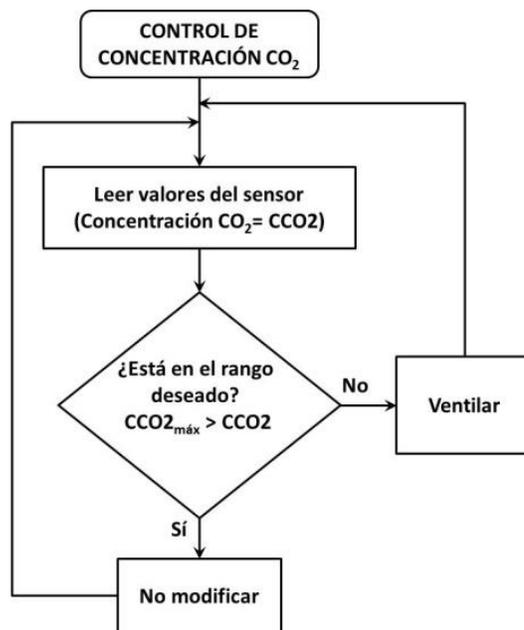


Figura 3.14 – Diagrama del proceso “Control de concentración de CO<sub>2</sub>”

## ***Sistema de monitoreo y controles***

Si bien el entorno de desarrollo de Arduino incluye una herramienta llamada Monitor Serial (Serial Monitor) que permite el monitoreo del programa generado a través del envío de mensajes entre la tarjeta y la computadora a través del puerto serial seleccionado, no se consideró como opción para la interfaz con el usuario debido a que se limita únicamente al envío y recepción de cadenas de caracteres.

Para el sistema de monitoreo y controles, cuyo subsistema o herramienta principal es la interfaz gráfica de usuario, se seleccionó el software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), el cual es una plataforma y entorno de desarrollo de programas que no sólo permite la transmisión de cadenas de caracteres por medio del puerto serial, para la comunicación con el sistema de procesamiento (adquisición de datos), sino que contiene un considerable número de herramientas para analizar y desplegar dicha información a través de elementos tanto gráficos como numéricos.

LabVIEW emplea un lenguaje de programación de flujo de datos, conocido como “G” para generar programas, llamados también instrumentos virtuales (VIs). La construcción y ejecución de dichos programas se determina por la estructura de un diagrama de bloques, en el cual las funciones e instrucciones están representadas por elementos o nodos gráficos, de manera que para la programación se requiere únicamente la conexión o *cableado* de dichos elementos.

Cada uno de estos programas o VIs contiene tres componentes principales:

- *Panel frontal*: también conocido como la interfaz de usuario, es la ventana donde se colocan los controles (botones, perillas, discos de selección y otros dispositivos de entrada) y los indicadores (gráficas, LEDs y otros elementos de visualización) con los que interactúa el usuario u operador, permitiéndole introducir o extraer datos en un instrumento virtual en operación.
- *Diagrama de bloques*: es la ventana donde se genera el código del programa. Los elementos colocados en el panel frontal se representan como terminales en el diagrama de bloques, que incluye también funciones, constantes, estructuras, y otros subVIs, así como los cables de conexión entre todos ellos, para generar el código fuente del programa. La estructura del diagrama de bloques se asemeja a un diagrama de flujo.
- *Panel conector*: identificado a través del ícono en la esquina superior derecho de la ventana de LabVIEW, es un conjunto de terminales que corresponde a los controles e indicadores del programa en general, definiendo las entradas y salidas que pueden ser conectadas al VI para usarlo como un subVI (un VI como función dentro de otros VIs). Es similar a la lista de parámetros en una llamada de función en un lenguaje de programación textual.

Los elementos incluidos en la interfaz gráfica generada para el sistema de monitoreo y control de variables ambientales, mostrados en las Figuras 3.15 y 3.16, se enlistan a continuación. En el caso del presente trabajo, no fue requerido el uso del panel conector, por lo que no se hace ninguna descripción del mismo.

1. *Indicadores del tiempo transcurrido*: como su nombre lo señala, en estos indicadores se muestra el tiempo que corre durante cada prueba, tanto en segundos como en minutos. Ambos indicadores se reinician cada vez que transcurre el tiempo establecido para la prueba.

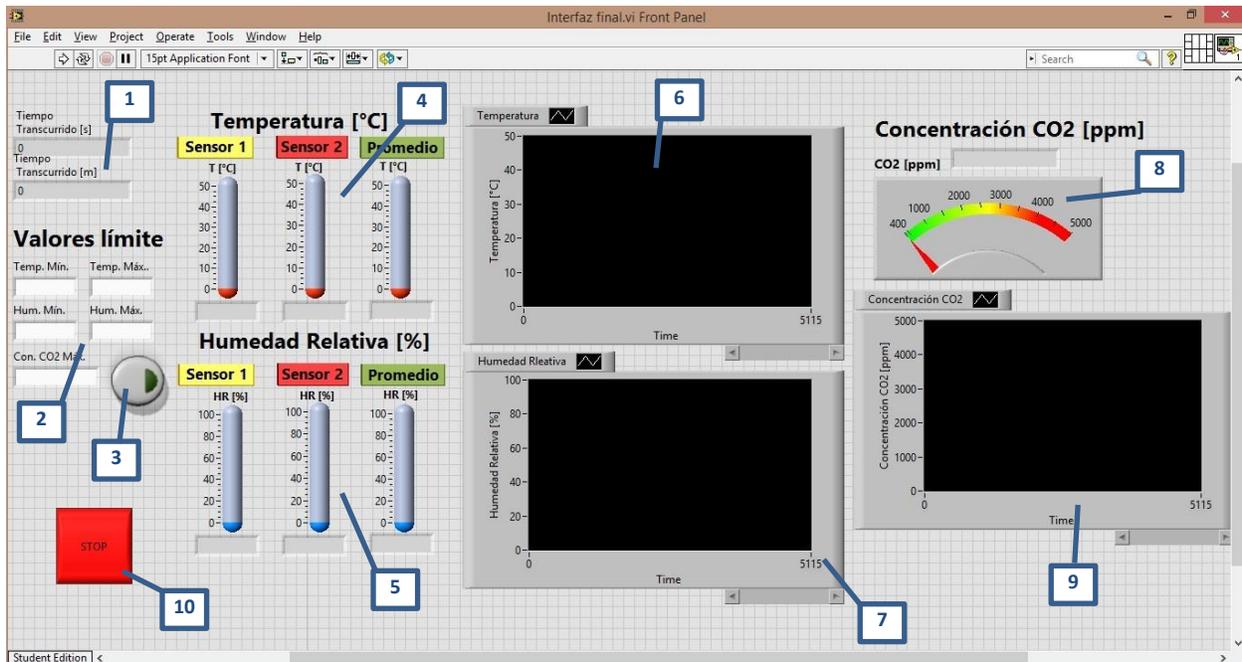


Figura 3.15 – Panel frontal de la interfaz gráfica de usuario

2. *Controles de valores límite:* en esta sección de la interfaz se encuentran los recuadros para el ingreso de los rangos de valores para las variables de temperatura y humedad relativa y el valor máximo para la concentración de dióxido de carbono.
3. *Botón de escritura:* Aún si los recuadros mencionados en el punto anterior contienen información, los valores no serán registrados por el programa hasta que se presione este botón.
4. *Indicadores de temperatura:* Muestran de manera gráfica y numérica las variaciones de la temperatura medidas en el sensor 1 y el sensor 2, así como el valor promedio.
5. *Indicadores de humedad relativa:* Muestran de manera gráfica y numérica las variaciones de la humedad relativa medidas en el sensor 1 y el sensor 2, así como el valor promedio.
6. *Gráfica de temperatura:* Genera las curvas del comportamiento de la variable temperatura, desplegando a la vez los datos de ambos sensores así como el valor promedio.
7. *Gráfica de humedad relativa:* Genera las curvas del comportamiento de la humedad relativa, desplegando a la vez los datos de ambos sensores así como el valor promedio.
8. *Indicadores de concentración de CO<sub>2</sub>:* Despliegan de manera gráfica y numérica el nivel de concentración de dióxido de carbono.
9. *Gráfica de concentración de CO<sub>2</sub>:* Genera la curva de comportamiento de la concentración de dióxido de carbono durante la prueba.
10. *Botón de paro;* Detiene la ejecución de la interfaz.

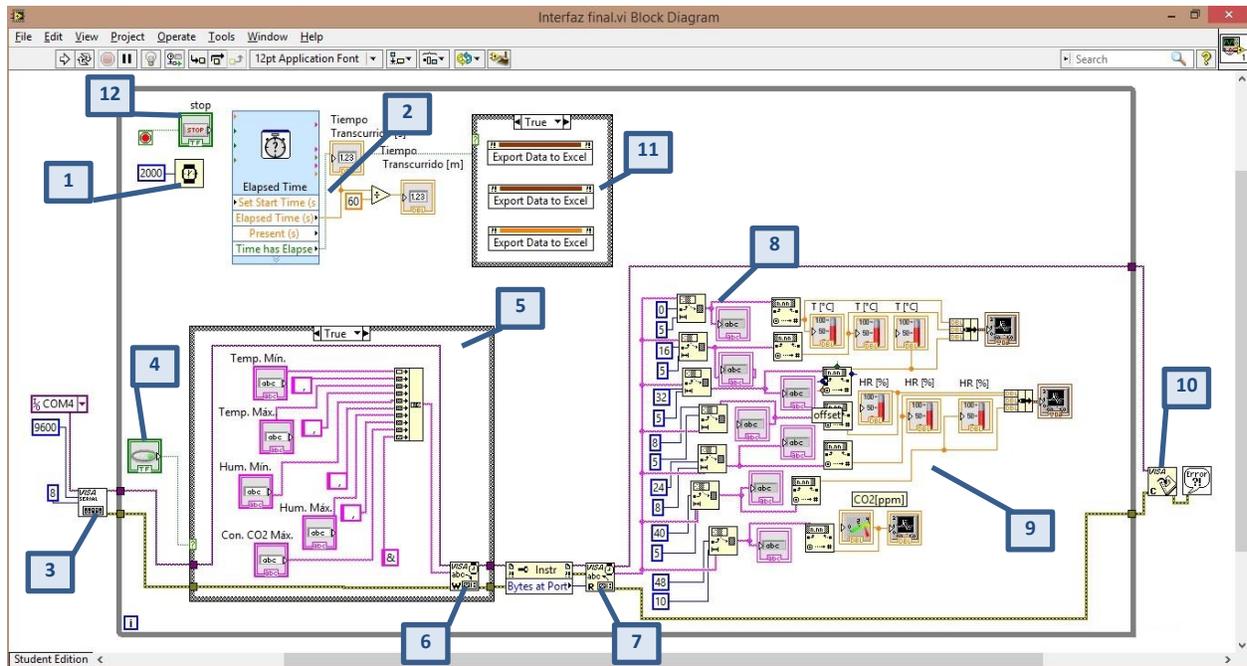


Figura 3.16 – Panel de control de la interfaz gráfica de usuario

1. *Timer o temporizador*: controla el tiempo de ejecución del ciclo que contiene todo el programa de la interfaz. Es a la vez quien establece la sincronización con el tiempo de ejecución del programa en el Arduino.
2. *Contador*: despliega el tiempo que ha transcurrido durante la prueba, a través de los indicadores respectivos en el panel frontal. A su vez, establece el tiempo en el que se reinicia la prueba, mismo que genera el registro de los datos en excel.
3. *Inicio de la comunicación serial*: Como su nombre lo indica, “abre” o inicia la comunicación entre la interfaz y el microcontrolador, a través del puerto serial.
4. *Botón de escritura*: Indica el cambio de estado del botón de escritura mostrado en el panel frontal.
5. *Ciclo de registro de valores límite*: Cuando el estado del botón de escritura es alto o verdadero, envía los valores límites registrados a través del puerto serial en una cadena con los distintos signos que sirven al programa del Arduino como separadores para el registro de cada valor.
6. *Escritura serial*: Envía datos a través del puerto serial. Es el equivalente al `Serial.Write()`.
7. *Lectura serial*: Lee los datos recibidos a través del puerto serial. Es el equivalente al `Serial.Read()`.
8. *Lectura de variables*: Separa los caracteres de la cadena recibida por el puerto serial en cada una de las variables que se están monitoreando.
9. *Despliegue de valores*: Muestra los valores recibidos por el puerto serial a través de los indicadores gráficos y numéricos descritos en el panel frontal.

10. *Fin de la comunicación serial:* Cierra o detiene la comunicación entre la interfaz y el microcontrolador una vez que se presiona el botón de paro.

11. *Envío de datos a Excel:* Genera un archivo de Excel con los valores registrados en las gráficas de las tres variables, una vez que ha transcurrido el tiempo de la prueba establecido por el contador.

12. *Indicador del botón de paro:* Determina el cambio en el estado del botón de paro, deteniendo el programa una vez que el botón es presionado.

### **Sistema de modificación de variables ambientales**

El sistema de modificación de variables ambientales se compone principalmente por los actuadores encargados de realizar cambios en las variables seleccionadas, cuando éstas no se encuentran dentro del rango deseado. El concepto elegido determina el uso de un sistema basado en la tecnología termoeléctrica para la modificación de la temperatura, así como la incorporación de un humidificador y un deshumidificador para la modificación de la humedad relativa, ambos en combinación con ventiladores tanto para la circulación del aire dentro de la cabina como la ventilación del interior (modificación de la concentración de dióxido de carbono).

Para el sistema de modificación de la temperatura se tomaron como base los diseños de Raut [46] y Protasiewytch [47], quienes proponen el uso de un sistema de aire acondicionado generado a partir de celdas termoeléctricas en contacto con disipadores de calor, a través de los cuales circula el aire cuya temperatura será enfriada, sin necesidad de refrigerantes, compresores, condensadores y otros elementos empleados por el sistema de aire acondicionado convencional. Ambos diseños presentan una configuración similar a la mostrada en la Figura 3.17.

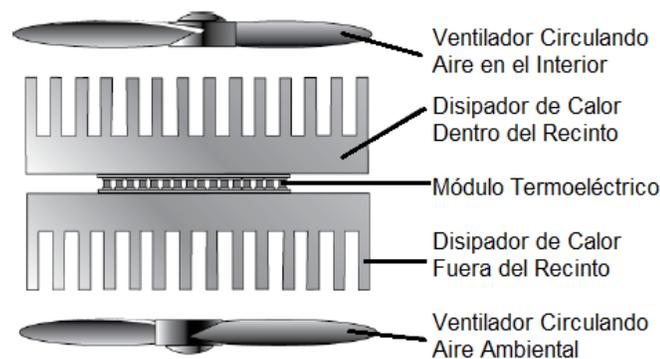


Figura 3.17 – Configuración general del sistema termoeléctrico para la modificación de la temperatura ambiental [46]

No obstante, tanto los diseños mencionados como la mayoría de aplicaciones que existen hoy en día para los módulos termoeléctricos se limitan a sistemas de enfriamiento, dejando de lado una de las principales ventajas que tienen éstos dispositivos, que es la reversibilidad del bombeo de calor, pues simplemente invirtiendo la polaridad se puede convertir un enfriador en un calentador.

El sistema propuesto en el presente trabajo emplea la celda termoeléctrica tanto como calentador como enfriador, variando la dirección de la polaridad con ayuda de un circuito con configuración de Puente H, el cual se describe con mayor detalle en la sección correspondiente al sistema de suministro de energía.

Tanto para la selección de la celda de Peltier, como los disipadores para emplearse en el sistema, se tomaron en cuenta los factores de presupuesto y asequibilidad del producto, se seleccionó el módulo termoeléctrico TEC1-12706, cuyas características se enlistan en la Tabla 3.4. Asimismo, debido a que la configuración del módulo de temperatura requiere que ambos lados, tanto el que entra en contacto con el sistema como el que sirve de escape, tengan las mismas características se eligieron los disipadores Steren 3313-75 y los ventiladores Steren VN4-012P, cuyas características se presentan en la Tabla 3.5.

CARACTERÍSTICA	VALOR	
Temperatura de Cara Caliente	25 [°C]	50 [°C]
Q <sub>máx</sub> (Potencia máxima @ΔT=0)	50 [W]	57 [W]
ΔT <sub>máx</sub> (Diferencia de temperatura máxima @Q=0)	66 [°C]	75 [°C]
Imáx (Corriente que produce el valor máximo de ΔT)	6.4 [A]	6.4 [A]
V <sub>máx</sub> (Voltaje que produce el valor máximo de ΔT)	14.4 [V]	16.4 [V]
Resistencia del módulo	1.98 [Ω]	2.30 [Ω]

Tabla 3.4 – Características de la celda de Peltier TEC1-12706 [61]

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje de alimentación	12 [Vcc]
Corriente de consumo	200 [mA]
Potencia	2.4 [W]
Decibeles	29.8 [dBA]
Velocidad	2700 [RPM]
Dimensiones	8 x 8 x 2.5 [cm]

Tabla 3.5 – Características del ventilador VN4-012P [62]

El factor más importante y más difícil de determinar con precisión es la cantidad de calor que se requiere absorber o remover a través de la cara fría, ( $Q_c$ ). En el caso del presente proyecto, la carga u objeto que se busca enfriar no está en contacto directo con la cara fría, sino que se trata del aire que fluirá a través del sistema, por lo que la temperatura que se busca generar en la cara fría de la celda, o  $T_c$ , debe ser considerablemente menor a la temperatura del aire deseada.

Para el cálculo de la cantidad de calor que se requiere absorber, se ocupó el modelo empleado por Raut [46], mostrado en la ecuación 11, el cual representa la carga de calor como el producto del flujo másico del aire ( $\dot{m}$ ), calor específico del aire ( $C_p$ ) y la diferencia de temperatura del sistema ( $\Delta T_s$ ).

$$Q_c = \dot{m}C_p\Delta T_s \quad (11)$$

$$\dot{m} = \rho \times Q \quad (12)$$

$$Q = v \times A \quad (13)$$

Dónde, el flujo másico del aire  $\dot{m}$ , se calcula como el producto del flujo volumétrico del aire por la densidad del mismo, (ecuación 12), siendo el valor del flujo volumétrico  $Q$ , resultado del producto de la velocidad del paso del aire y el área de la sección transversal del disipador (ecuación 13).

A su vez, la diferencia de temperatura  $\Delta T_s$  se refiere a la diferencia de temperatura del sistema, que como se mencionó anteriormente es la diferencia entre la temperatura del aire que ingresa al sistema y la temperatura del aire a la salida.

Se obtuvieron los valores de área de sección transversal  $A= 0.000658 \text{ [m}^2\text{]}$ , velocidad del aire  $v=4.1 \text{ [m/s]}$  aproximadamente, medido con un anemómetro. Se tomaron como valores de densidad y calor específico del aire  $1.164 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  y  $1005 \text{ [J/kg K]}$  respectivamente, así como un  $\Delta T_s$  de  $14 \text{ [K]}$ .

Sustituyendo los valores en las ecuaciones anteriores se obtuvo un valor de cantidad de calor  $Q_c= 44.18 \text{ [W]}$ .

$$Q = 4.1 \frac{m}{s} \times 0.000658 \text{ m}^2 = 0.002698 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m} = 1.164 \frac{kg}{m^3} \times 0.002698 \frac{m^3}{s} = 0.00314 \frac{kg}{s}$$

$$Q_c = 0.00314 \frac{kg}{s} \times 1005 \frac{J}{kg \cdot K} \times 14 \text{ K}$$

$$Q_c = 44.18 \text{ [W]}$$

De acuerdo con las especificaciones mencionadas en la tabla 3.5, la capacidad de bombeo de calor máxima ( $Q_{\text{max}}$ ) de la celda TEC12706 puede tener dos valores, que dependen de la temperatura a la que se mantenga la cara caliente ( $T_H$ ), siendo  $Q_{\text{max}} = 50 \text{ [W]}$  cuando  $T_H= 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$  y  $Q_{\text{max}} = 57 \text{ [W]}$  cuando  $T_H= 50^\circ\text{C}$ . En ambos casos, ( $Q_{\text{max}}$ ) tiene un valor mayor al obtenido en los cálculos anteriores, por lo que la celda seleccionada es aceptable.

Considerando la temperatura ambiental  $T_A = 35 \text{ [}^\circ\text{C]}$  y el incremento de temperatura del disipador al disipar la carga de calor  $\dot{m}$  con un valor  $15 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , valor típico para disipadores de convección forzada [63], se obtiene el valor de la temperatura de cara caliente  $T_H= 50 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Con este valor y con el valor anteriormente obtenido de  $Q_c = 44.14 \text{ [W]}$ , se entra a las gráficas proporcionadas en la hoja de especificaciones de la celda, como se muestra en la Figura 3.18.

De las gráficas se observa que al disipar una carga de  $44.18 \text{ [W]}$ , con una corriente recomendada de aproximadamente  $4.5 \text{ [A]}$ , se requiere de un voltaje de aproximadamente  $12.5 \text{ [V]}$ , generando una diferencia de temperatura de  $22.5 \text{ [}^\circ\text{C]}$  entre la cara fría y la cara caliente de la celda.

Así mismo, una caracterización previa realizada a con el conjunto celda-disipador- ventilador, mostró que dicha diferencia de temperatura depende tanto del voltaje como de la corriente exigida por la celda, pues, como se observa en la Figura 3.19, a  $12 \text{ [V]}$  y  $1.54 \text{ [A]}$  se consiguió un  $\Delta T$  máximo de  $9.96 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , mientras que los valores de  $\Delta T$  máximos obtenidos con  $5 \text{ [V]}$  y  $0.64 \text{ [A]}$  y  $3.3 \text{ [V]}$   $0.41 \text{ [A]}$ , son mucho menores. En los tres casos, se observa que el tiempo en que el módulo alcanza su valor de  $\Delta T$  máximo es prácticamente el mismo, por lo que no depende de los valores de alimentación, además de que es considerablemente rápido.

En el APÉNDICE C se anexa parte de la investigación realizada con respecto a la tecnología termoeléctrica, específicamente de los módulos o celdas de Peltier.

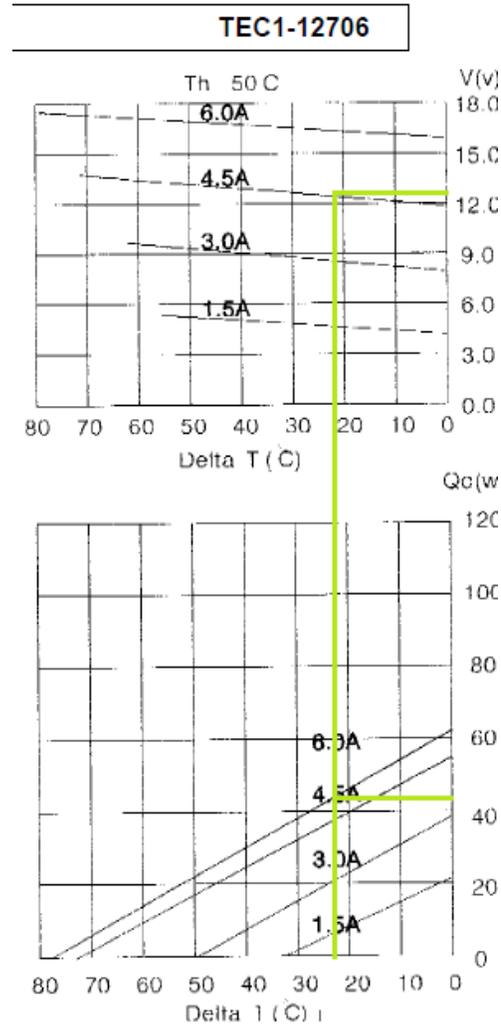


Figura 3.18 – Curvas de comportamiento de la TEC12706 y valores esperados [61]

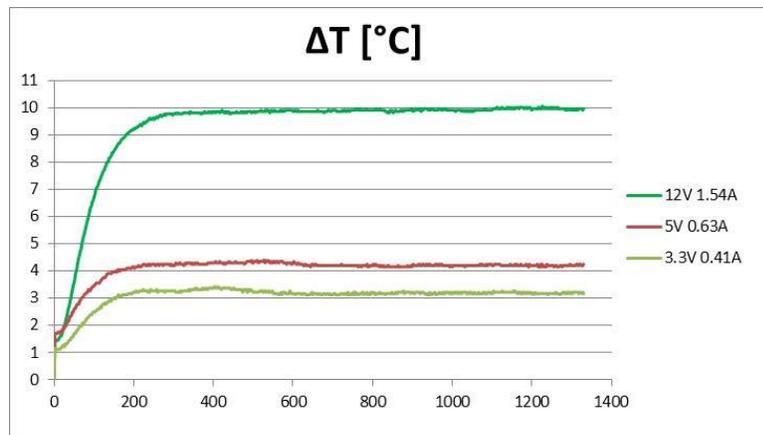


Figura 3.19– Valores de  $\Delta T$  resultantes de la caracterización de la TEC12706

En cuanto a la modificación de la humedad relativa, se seleccionó el uso de dos dispositivos separados, un humidificador para los incrementos de humedad, y un deshumidificador para la disminución.

Se seleccionó un humidificador de tipo ultrasónico, que descompone las gotas de agua en vapor fino a través de la vibración en frecuencia ultrasónica de un diafragma metálico.

El humidificador ultrasónico es más silencioso que algún otro tipo de evaporador o humidificador de vapor caliente, no requiere de intercambios de filtros y su consumo de energía es menor que el de otros humidificadores. El humidificador empleado en este proyecto es el CITIZEN™ CUN60, cuyas características se muestran en la Tabla 3.6. Dicho dispositivo se colocó dentro de un módulo en el cual se anexó un ventilador para ayudar a la distribución del vapor en el interior de la cabina. La activación de dicho humidificador se llevó a cabo directamente desde la tarjeta Arduino, con ayuda de un relevador como interruptor, como se menciona en la siguiente sección.

Característica	Valor
Voltaje de alimentación	220-240 [VAC] 50/60 [Hz]
Consumo de energía	10 [W] aprox.
Frecuencia ultrasónica	2.5 [MHz]
Tamaño de partículas	5 [ $\mu\text{m}$ ] MMAD
Dimensiones	88 x 53 x 143 [mm]
Peso	350 [g] aprox.

Tabla 3.6 – Características del humidificador CITIZEN™ CUN60 [64]

Con respecto a la deshumidificación del ambiente, se optó por emplear la tecnología de absorción empleando pequeñas esferas de dióxido de silicio, conocidas como gel de sílice, ya que por su porosidad tiene la capacidad de absorber hasta un 40% de humedad en espacios cerrados. Cuando el gel se satura, se puede reutilizar al someterlo a una temperatura elevada (150[°C]) aproximadamente. Para el sistema propuesto se empleó un deshumidificador para espacios cerrados, el cual cuenta con una gran cantidad de esferas de gel dentro de un encapsulado, además de incluir una lámina metálica que se calienta al conectar el dispositivo a la electricidad, cuando el gel requiere liberar la humedad una vez que se ha saturado.

En cuanto a la concentración de dióxido de carbono, se implementó un sistema de ventilación que emplea dos ventiladores para la evacuación del aire en la cabina y el ingreso de aire limpio a la misma, respectivamente. Los ventiladores empleados en esta sección son del mismo tipo que se ocupó para el módulo de temperatura, por lo que sus características fueron descritas anteriormente.

### ***Sistema de suministro de energía***

El principal elemento del sistema de suministro de energía es la fuente de alimentación para todos los dispositivos empleados. De acuerdo a las características del concepto de diseño seleccionado para el proyecto, se seleccionó el uso de fuentes de voltaje regulado, de corriente directa, del tipo empleado para las computadoras. Para garantizar que los dispositivos de mayor consumo, en este caso las celdas de Peltier y el sensor de dióxido de carbono, recibieran la energía necesaria y se manipularan de manera independiente, se emplearon dos fuentes de computadora con capacidades de 350 [W] y 400 [W] respectivamente. Asimismo, se utilizó como apoyo una fuente de laboratorio de voltaje y corriente regulados (máximo 30 [V] a 10 [a]).

Ésta última fue empleada para alimentar a las celdas de Peltier, debido a que no sólo permite modificar los valores de voltaje y corriente, si no que dichos valores pueden ser observados directamente en el monitor de la fuente.

Como se mencionó en la sección referente al sistema de sensado de variables, la alimentación para los sensores de humedad y temperatura se obtuvo directamente de la tarjeta Arduino, mientras que para el MG811, se empleó la salida de 12 [V] de una de las fuentes de computadora. Asimismo, la otra fuente de computadora se encargó de alimentar a los circuitos de potencia elaborados para la activación de los ventiladores y otros dispositivos empleados en el sistema de modificación de variables ya que debido a sus características y a las limitaciones de corriente proporcionadas por las salidas de la tarjeta Arduino, fue necesario generar circuitos de potencia para la activación de los actuadores, los cuales se describen a continuación.

El módulo de temperatura, encargado de la modificación de dicha variable, requirió del empleo de dos circuitos de potencia distintos: uno para la activación y control de la polaridad de las celdas de Peltier y otro para la activación de los ventiladores.

En el caso del primer circuito, se diseñaron tres puentes H idénticos, que funcionan bajo el mismo principio que se ilustra Figura 3.20, cuando los interruptores S1 y S4 se encuentran cerrados, S2 y S3 se encuentran abiertos y la corriente circula a través de la carga en una dirección, mientras que, cuando los interruptores S2 y S3 se cierran y S1 y S4 se abren, la corriente circula a través de la carga en la dirección opuesta, cambiando así su polaridad. En el puente H empleado para este proyecto, cuyo diagrama electrónico se ilustra en la Figura 3.21, se emplearon transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET) de potencia, debido a la alta corriente que demandan las celdas de Peltier. Cada puente H contiene dos MOSFET tipo N (Q3 y Q5) y dos tipo P (Q4 y Q6), además de dos transistores bipolares tipo NPN (Q1 y Q2) para la activación de cada dirección.

Al ser los MOSFET dispositivos controlados por voltaje y no por corriente, como es el caso de los transistores bipolares, requieren de un circuito de excitación muy simple, además de que es fácil adaptar elementos en paralelo. Sin embargo, son extremadamente sensibles a corrientes estáticas, y cuando la compuerta (semejante a la base de un transistor bipolar) se queda sin conexión, corren el riesgo de autodestruirse. Para evitar problemas con corrientes estáticas y con cualquier otro tipo de ruido, además de evitar el riesgo de autodestrucción se agregaron las resistencias R3, R4, R5 y R6, así como los diodos D3, D4, D5 y D6 y el capacitor C2.

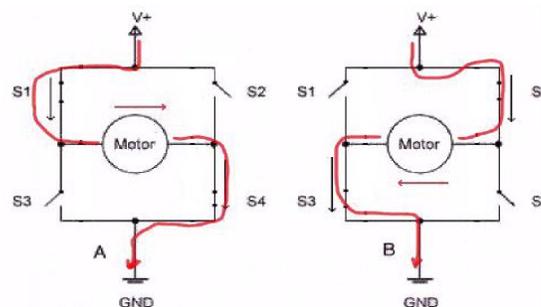


Figura 3.20 – Principio de funcionamiento del puente H. [65]

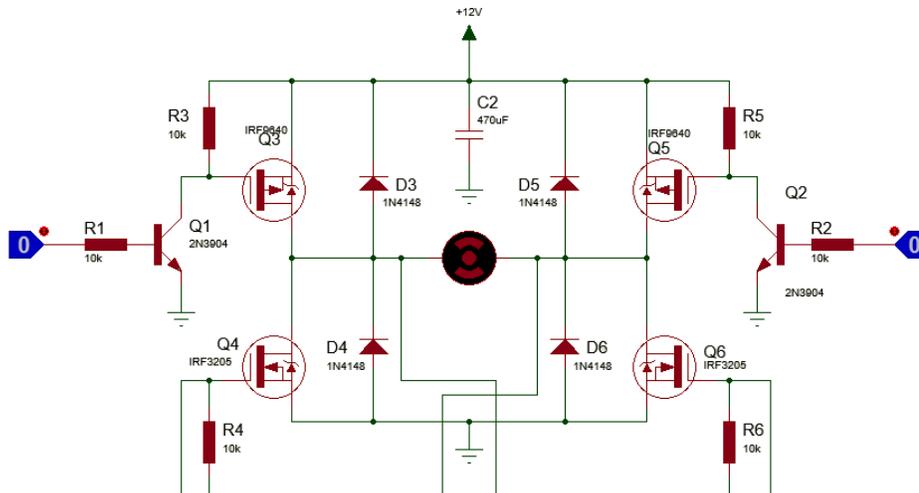


Figura 3.21 – Diagrama electrónico del puente H para celdas de Peltier

Para la activación de los ventiladores tanto del módulo de temperatura como el módulo de humidificación, se emplearon tres circuitos de potencia idénticos, ilustrados en la Figura 3.22. Se empleó este circuito porque no sólo permite la amplificación de corriente necesaria para transmitir la señal de salida procedente del Arduino, sino que permite el empleo de la modulación de ancho de pulso (PWM) para controlar las velocidades de los mismos. En este caso se empleó un transistor tipo Darlington.

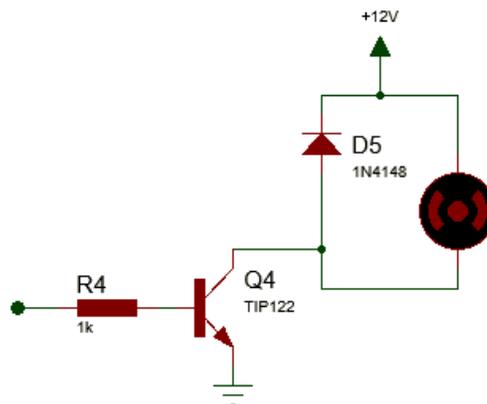


Figura 3.22 – Diagrama electrónico etapa de potencia de ventiladores

En cuanto a los ventiladores empleados para la modificación de la concentración de dióxido de carbono, así como el humidificador, se emplearon dos circuitos que emplean un relevador de 12 V como interruptor, ya que en ambos casos se requiere únicamente de un circuito de potencia para la activación y desactivación. Ambos circuitos emplean un transistor bipolar NPN para la amplificación de la corriente en la señal de salida del microcontrolador. El diagrama electrónico de estos circuitos se ilustra en las Figuras 3.23a y 3.23b, respectivamente.

Los diagramas de conexión de las placas de circuito impreso (PCB) generadas se anexan en el APÉNDICE D.

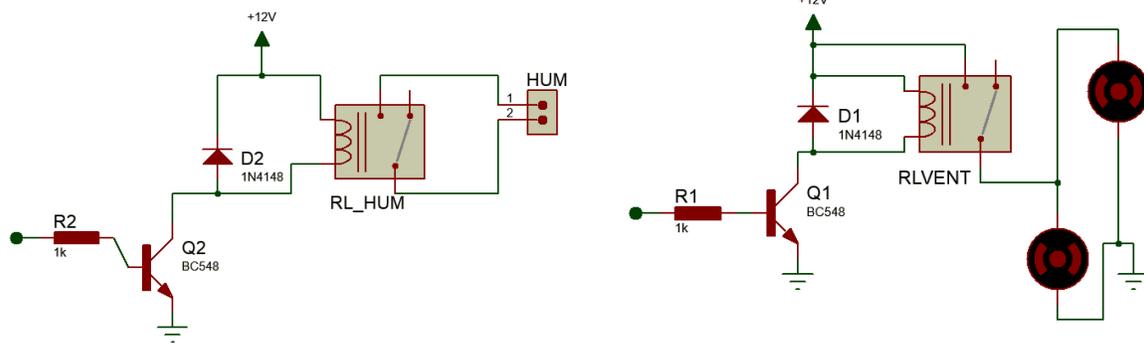


Figura 3.23 - a) Diagrama electrónico activación de humidificador;  
 b) Diagrama electrónico de activación de ventilación

# **CAPÍTULO 4**

# CAPÍTULO 4- PRUEBAS Y RESULTADOS

Siguiendo el proceso de desarrollo del producto, una vez identificados y seleccionados los elementos físicos y funcionales del concepto, se procede a realizar la prueba del mismo.

La prueba del concepto busca una respuesta en función de una descripción o representación del producto, de tal manera que relaciona la selección del concepto con la construcción de prototipos o modelos funcionales [53].

Asimismo, es necesario definir qué preguntas se buscan responder ante la representación del concepto que se evaluará durante la prueba, ya que al tratarse de una actividad experimental, se requiere conocer el propósito de dicho experimento para diseñar el método o protocolo efectivo, así como el nivel de detalle que se buscará durante la construcción del prototipo o modelo funcional.

Los resultados obtenidos durante las pruebas del concepto pueden verificar que las necesidades del cliente han quedado satisfechas de manera adecuada por el concepto, así como proporcionar información referente a la interacción del producto con el ambiente y/o el usuario, misma que puede ser empleada posteriormente para refinar, reemplazar o descartar el concepto del producto [53].

En el caso del presente trabajo, el propósito de las pruebas es el de observar la interacción de los subsistemas que integran el sistema propuesto, dentro de un espacio parecido a la aplicación final, así como la verificación de la capacidad de los elementos propuestos para llevar a cabo modificaciones en las variables ambientales seleccionadas, ya que al tratarse de la primera iteración de diseño del sistema, el alcance se limita a comprobar si dicha propuesta es viable.

## 4.1 Instalación del sistema

Como se comentó anteriormente, se buscó realizar las pruebas del concepto en un espacio parecido al que sería el de la aplicación final del sistema. Ya que no se cuenta con un simulador de conducción al cual se le pudiera implementar el sistema propuesto, las pruebas se llevaron a cabo empleando un automóvil de uso común, el cual se ubicó dentro de un estacionamiento techado durante todo el tiempo requerido para las pruebas, de manera que no se viera afectado tan drásticamente por las condiciones ambientales exteriores, principalmente la radiación del sol. La Figura 4.1 muestra el vehículo en el espacio donde se llevaron a cabo las pruebas.

Asimismo, no se pudieron realizar modificaciones en la estructura o componentes del vehículo empleado, por lo que la instalación de los módulos de modificación de variables se realizó de manera superficial, como se ilustra en las Figuras 4.2a y 4.2b.

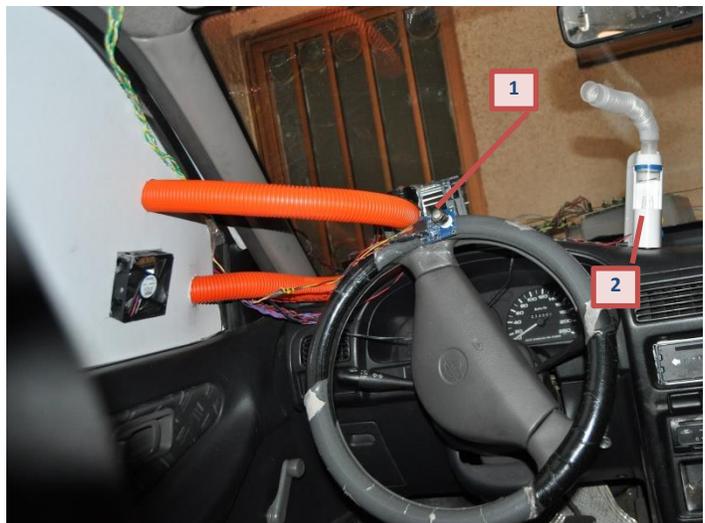
En cuanto a los subsistemas de suministro de energía, procesamiento y el monitoreo de las variables, fueron ubicados fuera del vehículo, ya que en la aplicación final, estos sistemas no requieren estar en el interior de la cabina para llevar a cabo sus funciones.



Figura 4.1 – Vehículo en espacio de pruebas (estacionamiento cubierto)



a)



b)

Figura 4.2a y 4.2b Localización de los módulos de temperatura (1) y humedad (2) dentro de la cabina

Con respecto a los sensores de temperatura y humedad, se tomaron como referencia las posiciones empleadas por Zhang [66], Huang [67] y Kaynakli [68], ilustradas en la Figura 4.3a, mientras que la Figura 4.3b muestra la ubicación de dichos sensores en el vehículo, durante las pruebas realizadas.

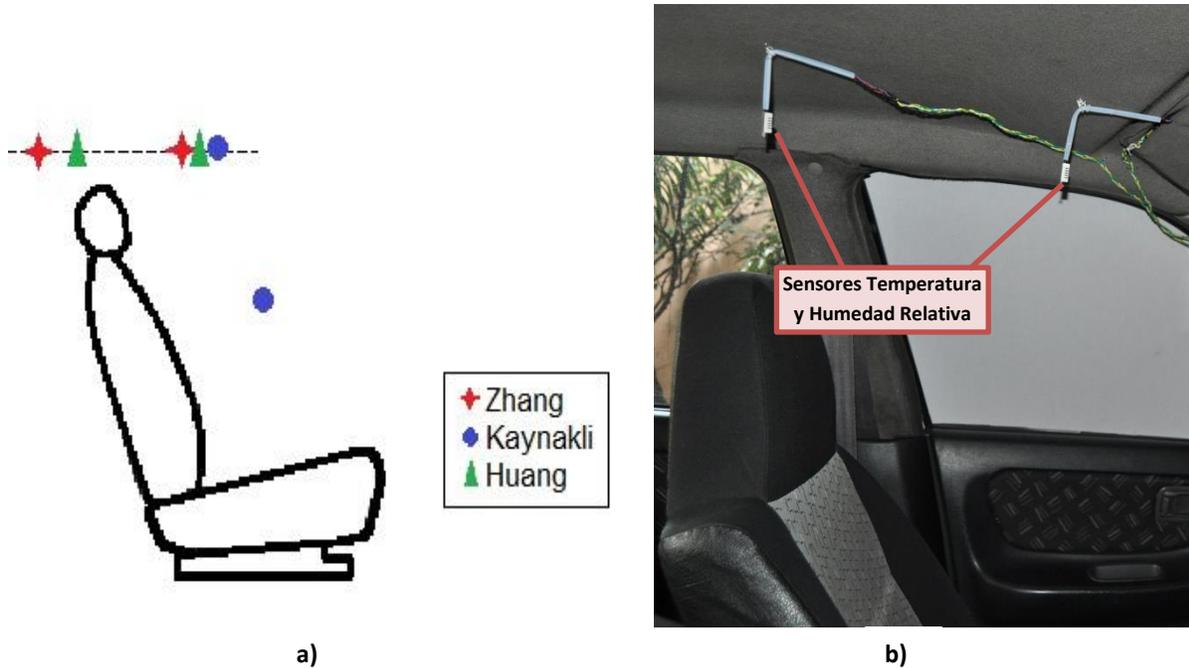


Figura 4.3 – a) Localización de los sensores de temperatura empleados en [66], [67] y [68]  
b) Localización de los sensores de temperatura y humedad relativa RHT03

Como se observa en la Figura 4.4, el sensor de dióxido de carbono se colocó enfrente del conductor, debido a que se busca medir la concentración especialmente en el área de respiración del usuario, tanto por ser éste la principal fuente de generación del mismo, como por el hecho de ser el aire que se encuentra en esta área el mismo que ingresa al organismo.

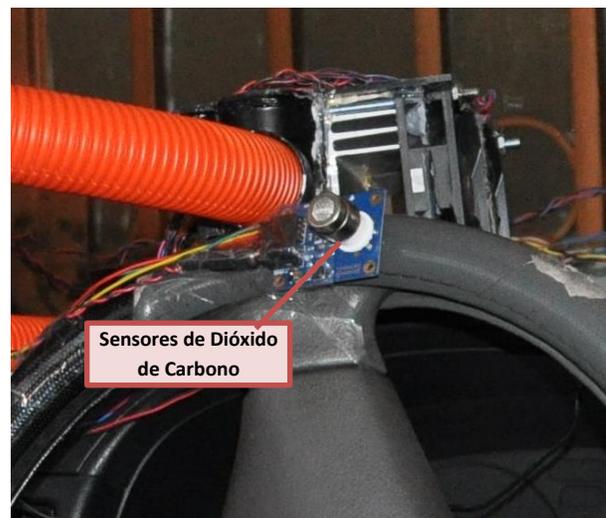


Figura 4.4 – Localización del sensor de concentración de CO<sub>2</sub>

## 4.2 Pruebas y resultados

Con la finalidad de observar la interacción entre los subsistemas que conforman el sistema propuesto, así como evaluar si los elementos empleados cumplen con los requerimientos establecidos en el diseño conceptual, se llevaron a cabo una serie de pruebas, siguiendo un protocolo general, que se describe a continuación.

### *Protocolo de prueba del concepto:*

#### Instalación del sistema

1. Se ubica el vehículo dentro del espacio techado.
2. Se realiza la instalación de los sensores y dispositivos que componen cada subsistema, iniciando con los sensores y actuadores dentro de la cabina, seguido de los elementos de alimentación de energía y finalizando con la conexión de los circuitos, a excepción del sensor de CO<sub>2</sub>, el cual requiere de un tiempo de calentamiento previo de por lo menos dos horas. En el caso del humidificador, se revisa el nivel de agua contenido y se rellena, en caso de ser necesario.
3. Se instala el puesto de monitoreo y se conecta la computadora, con la interfaz virtual previamente cargada, al resto del sistema.
4. En el caso de las pruebas sin usuario, se procede a iniciar la prueba. En el caso de las pruebas con usuario, se le pide al usuario que ingrese a la cabina y posteriormente se inicia la prueba.

#### Realización de la prueba

1. Se activan los elementos del sistema al prender las fuentes de alimentación.
2. Se inicia el monitoreo del sistema. Simultáneamente se registran los valores de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono en el exterior del vehículo.
3. Se anotan los datos leídos tras los primeros cuatro segundos transcurridos, estos son los valores correspondientes al estado inicial del sistema.
4. Se ingresan los valores límite para temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono que se buscan obtener en la prueba.
5. Se monitorea el estado de las variables en la interfaz gráfica, durante un tiempo de 30 minutos en los que se realiza una lectura cada 4 segundos (450 lecturas por prueba).
6. Al transcurrir los 30 minutos, se detiene el programa de la interfaz. Asimismo, se registran simultáneamente los últimos valores leídos correspondientes al estado final del sistema, así como los valores del exterior.
7. Se almacenan los datos obtenidos durante la prueba.

Durante todas las pruebas, el vehículo permanece cerrado durante los 30 minutos.

Debido a que la finalidad de las pruebas llevadas a cabo en esta iteración de la propuesta no tiene una relación directa con las características del usuario, éstas fueron despreciadas, por lo que el sujeto de estudio fue el mismo para todas las pruebas correspondientes a los casos I y III.

Debido a las características ambientales registradas en los días que se llevaron a cabo las pruebas y a las limitaciones en cuanto al tiempo disponible para su realización, se determinó que para todas las pruebas se buscara un incremento en la concentración de la humedad relativa.

Se llevaron a cabo en total 12 pruebas, clasificadas en cuatro distintos casos, nombrados Caso I, Caso II, Caso III y Caso IV, realizándose un total de tres pruebas para cada protocolo. Dichos casos difieren principalmente en dos características: la presencia o ausencia de un usuario en la cabina del vehículo y el comportamiento esperado en cuanto al sistema de modificación de variables, como se describe más adelante.

En esta sección se presentan tanto los resultados obtenidos durante las pruebas del concepto como el análisis de los mismos. Dicho análisis se enfoca en la descripción del patrón de comportamiento de cada una de las pruebas correspondientes a los cuatro casos empleados, con respecto al resultado que se buscaba obtener.

Para ello, se generaron las gráficas de *variación* y *error*, siendo la variación la diferencia entre cada valor leído y el valor inicial registrado, mientras que el error se obtuvo como el valor absoluto de la diferencia entre el valor objetivo (al cual se buscó llegar) y cada valor leído. La gráfica de variación muestra también la curva normalizada correspondiente a cada prueba dentro de un mismo caso, de manera que permite comparar el cambio generado en el sistema durante dichas pruebas, a partir de un mismo punto inicial. Asimismo, la gráfica del error permite observar el comportamiento del sistema con respecto a la aproximación del valor objetivo, es decir, que tanto se acercó el resultado obtenido al resultado deseado.

Además de las gráficas de variación y error de las pruebas de cada caso, se generó una gráfica donde se obtuvo una curva con los valores promedio de las tres pruebas, así como las gráficas de variación y error correspondientes a dicha curva, para ilustrar de manera generalizada el comportamiento de cada caso con respecto a su objetivo.

Cabe mencionar que la realización de las tres pruebas correspondientes a cada caso no se llevaron a cabo de manera secuencial, es decir, todas las del mismo tipo una tras otra, si no que se intercalaron, de manera que algunas pruebas muestran diferencias considerables entre unas y otras, aun tratándose del mismo caso, por las variaciones en las condiciones ambientales que se presentaron entre un día y otro.

A continuación se describen los cuatro casos, con sus respectivos resultados y análisis.

## CASO I

Esta prueba consistió en el monitoreo del sistema considerando la presencia de un usuario dentro de la cabina. Asimismo, se buscó que el sistema de modificación de variables llevara la temperatura a un valor mayor al que se encontraba el ambiente en el interior de la cabina, es decir, que calentara la cabina.

Además de los pasos seguidos en el protocolo general, para la realización de esta prueba se siguieron los siguientes pasos:

- Al terminar la instalación del sistema y previo al inicio de la prueba, se notificó al usuario el tiempo de duración de la prueba, así como de la variación que se buscaba lograr dentro del ambiente.
- Se le indicó al usuario la importancia de no tocar ninguno de los elementos ubicados dentro del vehículo. Asimismo, se le explicó el comportamiento de los elementos, para aclarar la improbabilidad de algún riesgo para su seguridad.
- Se le pidió al usuario ingresar al vehículo, ocupando el asiento del conductor, así como permanecer sentado durante toda la prueba.
- Una vez terminada la prueba, se le pidió al usuario abandonar el vehículo y se le agradeció su cooperación.

Para las tres pruebas se establecieron como valores a alcanzar una temperatura entre 30 y 32°C, humedad relativa entre 40 y 45% y un límite de 1500 ppm para la concentración de dióxido de carbono.

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante las tres pruebas realizadas siguiendo el procedimiento del Caso I.

### Prueba 1:

Al inicio de la prueba se registraron los siguientes valores de condiciones ambientales en el exterior de la cabina: temperatura de 25.6°C y humedad relativa del 36.4%, así como 27.05°C de temperatura y 32.75% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Al término de la prueba, es decir después de 30 minutos, las condiciones exteriores fueron de 25.3°C y 38.8% (temperatura y humedad relativa, respectivamente), mientras que en el interior se obtuvieron **29.25°C** de temperatura y **35.05%** de humedad relativa.

La Tabla 4.1 y la Figura 4.5 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 1		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	27.05	32.75
3	27.45	35.3
6	28.1	35.2
9	28.55	34.95
12	28.75	35.35
15	28.95	34.55
18	29.05	34.75
21	29.05	34.4
24	29.05	34.2
27	29.15	34.85
30	29.25	35.05

Tabla 4.1 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso I

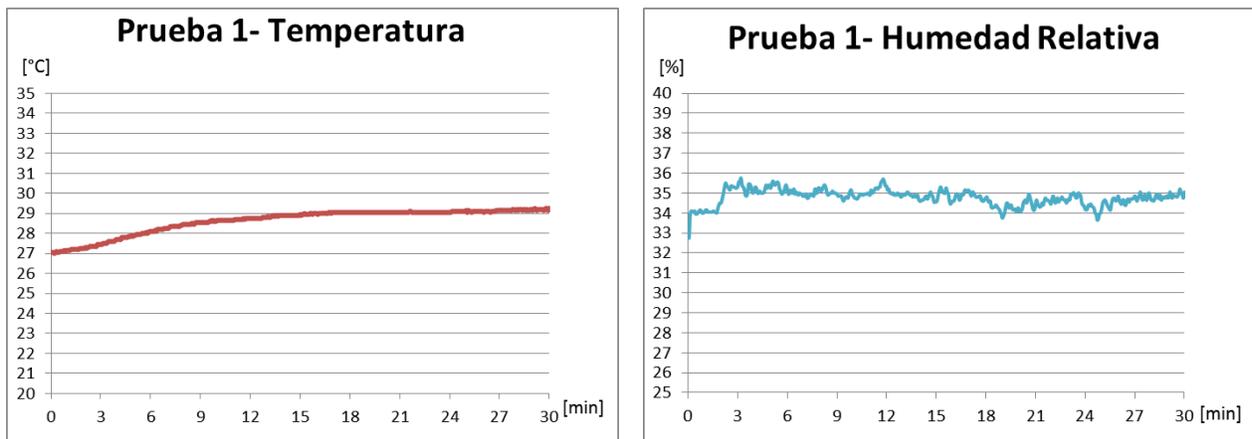


Figura 4.5 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso I

## Prueba 2:

Las condiciones ambientales iniciales para esta prueba se registraron con valores de: temperatura de 24.8°C y humedad relativa del 35.9% en el exterior de la cabina, y de 25.45°C de temperatura y 30.25% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Al término de la prueba, las condiciones exteriores fueron de 24.7°C de temperatura y 36.1% de humedad relativa, y se obtuvo una temperatura de **28.00°C** y concentración de humedad relativa de **34.60%** en el interior de la cabina.

La Tabla 4.2 y la Figura 4.6 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 2		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	25.45	30.25
3	26.15	32.35
6	26.85	32.4
9	27.35	32.5
12	27.65	32.8
15	27.7	33.05
18	27.75	33.5
21	27.85	33.6
24	27.95	33.95
27	28	34.45
30	28	34.6

Tabla 4.2 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso I

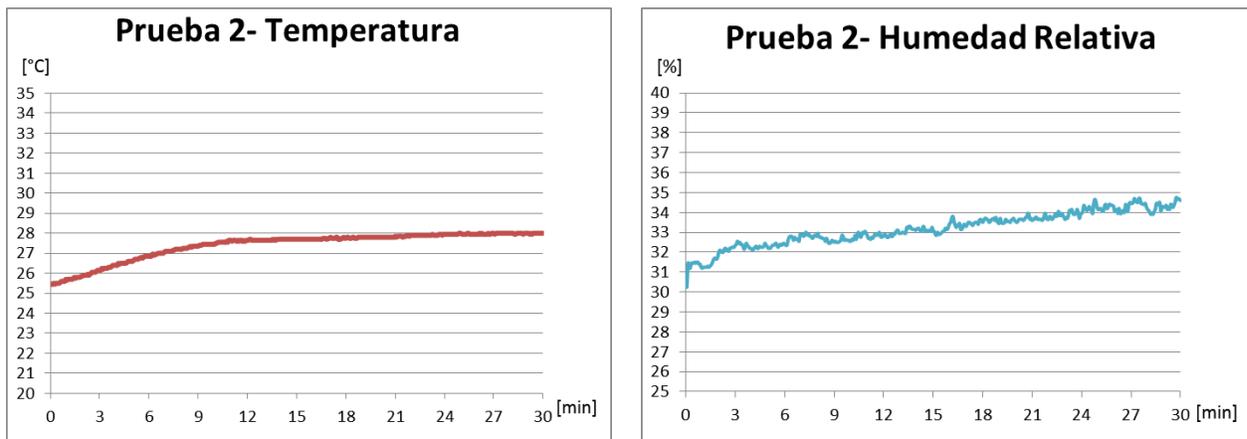


Figura 4.6 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso I

### Prueba 3:

Los valores de las condiciones ambientales iniciales para esta prueba fueron de: 30.2°C de temperatura, 27.7% de humedad relativa en el exterior de la cabina, y de 28.8°C de temperatura, 26% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Después de 30 minutos, las condiciones exteriores fueron de 30.3°C, 28.3% (temperatura y humedad relativa, respectivamente). En el interior de la cabina se obtuvo una temperatura de **29.15°C**, y un valor de **26.85%** de humedad relativa.

La Tabla 4.3 y la Figura 4.7 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 3		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	28.8	26
3	28.75	26.15
6	28.75	26.55
9	28.85	26.35
12	29.05	26.75
15	29.2	26.75
18	29.25	26.6
21	29.1	26.75
24	29.25	26.85
27	29.25	26.75
30	29.15	26.85

Tabla 4.3 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso I

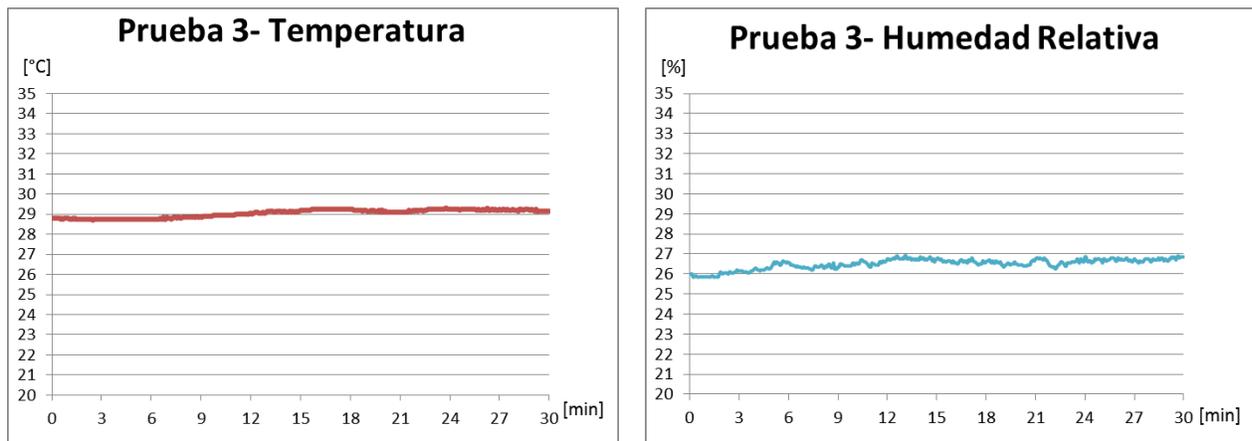


Figura 4.7 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso I

En la gráfica del inciso c) de la Figura 4.8, que ilustra el análisis referente a la variable temperatura, se muestran las curvas normalizadas de la variación que se presentó durante cada prueba realizada en el Caso I, con respecto al valor inicial. Se puede observar que el valor máximo de variación se registró en la Prueba 2, donde se obtuvo un **incremento** de aproximadamente **2.55°C**, seguido por el **incremento** de **2.20°C** registrado en la Prueba 1, siendo el valor mínimo de incremento el registrado en la Prueba 3, dónde el **incremento** tuvo un valor aproximado de tan solo **0.35°C**.

La curva que representa el comportamiento del **promedio** del Caso I, mostrado en la gráfica de la Figura 4.8d, presenta un **incremento máximo** de aproximadamente **1.7°C**.

Comparando estas respuestas con la gráfica mostrada en la Figura 4.8a, donde se muestran las tres respuestas de las pruebas y la gráfica del promedio en relación con el valor esperado, se observa que la magnitud de las variaciones guarda relación directa con la diferencia que había entre el valor inicial de cada prueba y el valor objetivo.

Por otra parte, del análisis respecto al valor de error, ilustrado en las gráficas de los incisos 4.8e y 4.8f que refleja la capacidad del sistema en cada prueba para acercarse al valor esperado, o para mantener el sistema lo más cercano a la condición deseada, se puede observar que la Prueba 2 presentó el menor acercamiento al valor objetivo, siendo su mínimo valor de error de aproximadamente **2°C**, mientras que la Prueba 1 logró alcanzar un error menor a **1°C** desde aproximadamente la mitad de la prueba, alcanzando un mínimo de **0.75°C** al final del tiempo de duración.

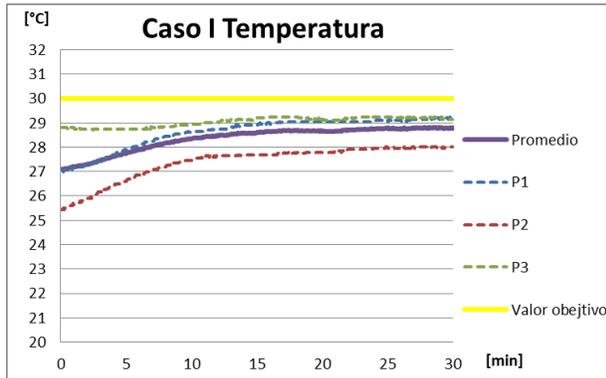
Asimismo, la Prueba 3 trabajó en un rango de error de **1.5°C** con respecto al valor esperado durante los primeros diez minutos, manteniéndose en valores aproximados a **0.85°C** de error durante el resto de la prueba. Con respecto a la gráfica correspondiente al **promedio**, se observa que el valor **mínimo** de **error** obtenido fue de **1.2°C**.

Las gráficas correspondientes al análisis del comportamiento del sistema con respecto a la variable humedad relativa se ilustran en los incisos de la Figura 4.9.

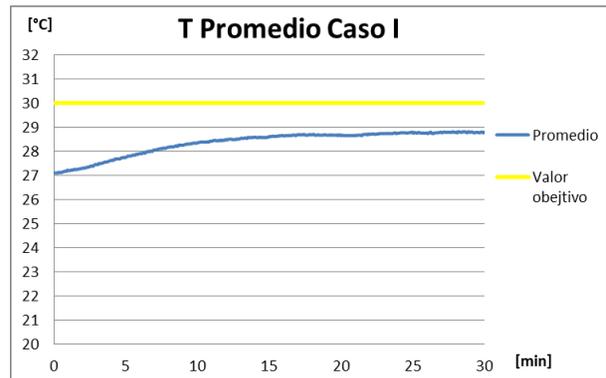
En el caso de la variación del valor de humedad relativa con respecto al valor inicial, las gráficas de las curvas normalizadas mostradas en la Figura 4.9c permiten observar que la magnitud máxima de variación se registró en la Prueba 2, donde se presentó un **incremento de 4.35%**, seguido del **incremento** con valor **de 2.3%** registrado en la Prueba 1, siendo el **incremento de 0.85%** obtenido en la Prueba 3 el valor mínimo de variación. El valor de la **variación** del **promedio** presentó un **incremento máximo** de aproximadamente **2.5%**.

La gráfica de la Figura 4.9e presenta los valores máximos y mínimos del error, es decir, la diferencia con respecto al valor objetivo, siendo el **mínimo** valor de **error** de **4.95%** y **5.4%** de humedad relativa, observado al final de las Pruebas 1 y 2 respectivamente, mientras que el **máximo** valor de **error**, obtenido en la Prueba 3, fue de **13.15%** de humedad relativa distante del valor esperado. El valor **mínimo** de **error** observado en la gráfica del **promedio** (Figura 4.9f) es de **7.83%** de humedad relativa.

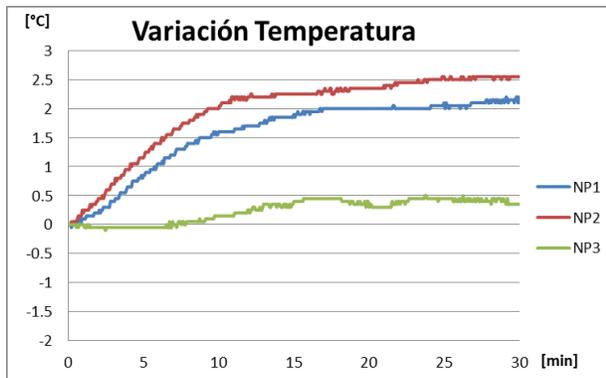
Comparando las gráficas de variación y error con la gráfica del comportamiento de las tres pruebas y el promedio con respecto al valor objetivo, mostrada en la Figura 4.9a, se observa que a diferencia de la temperatura, en el caso de la humedad relativa, tanto la variación más pequeña como el error más grande se obtuvieron en la prueba cuyo valor inicial se encontraba más alejado del valor objetivo.



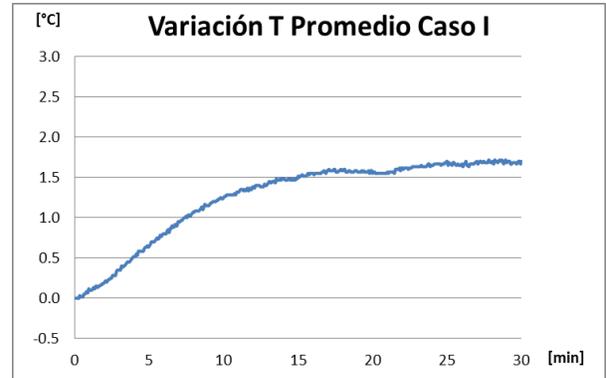
a)



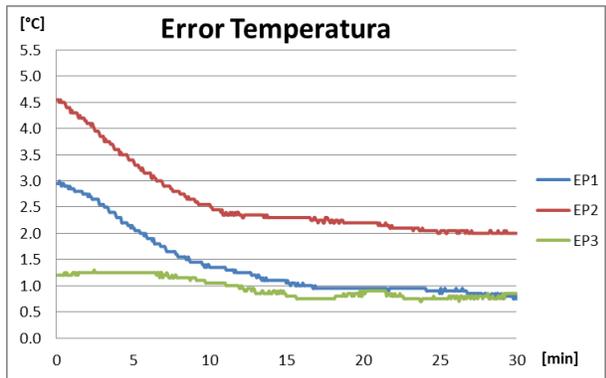
b)



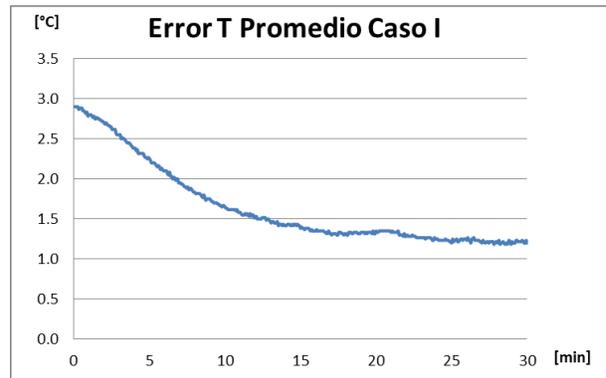
c)



d)

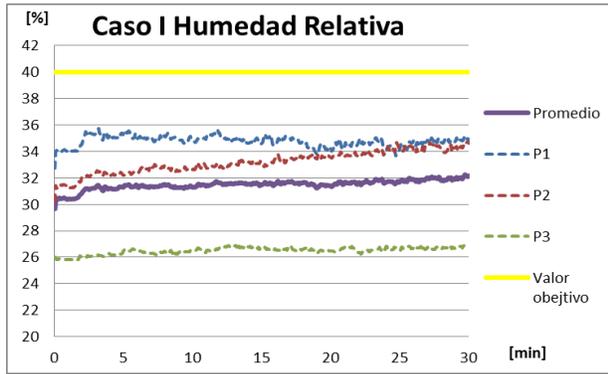


e)

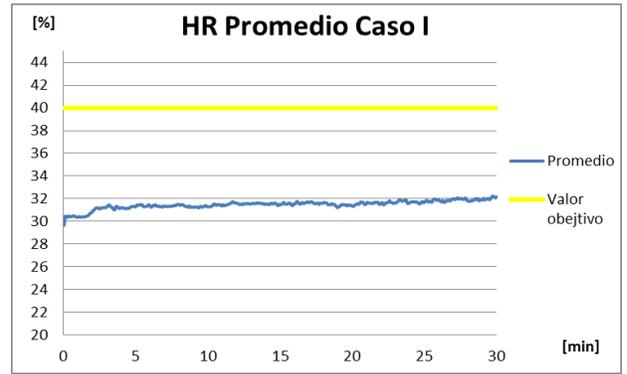


f)

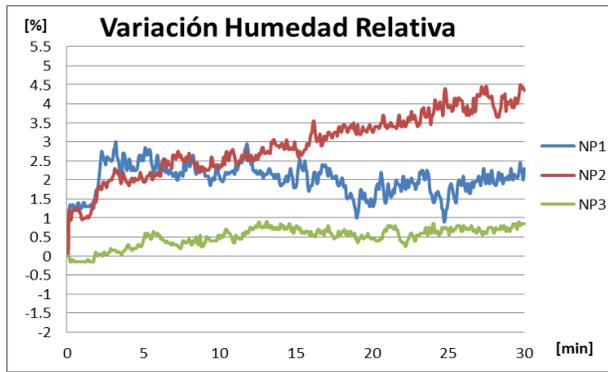
Figura 4.8 – Análisis de cambios de temperatura en las pruebas del Caso I



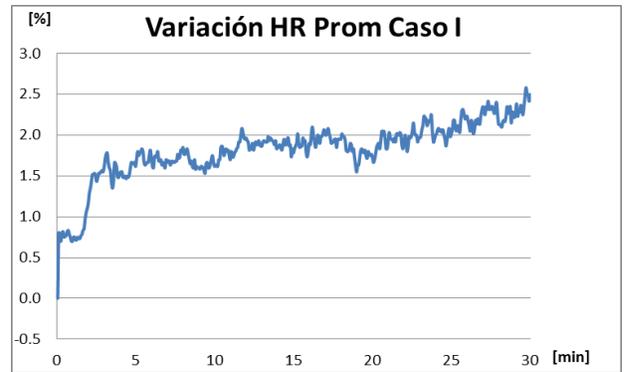
a)



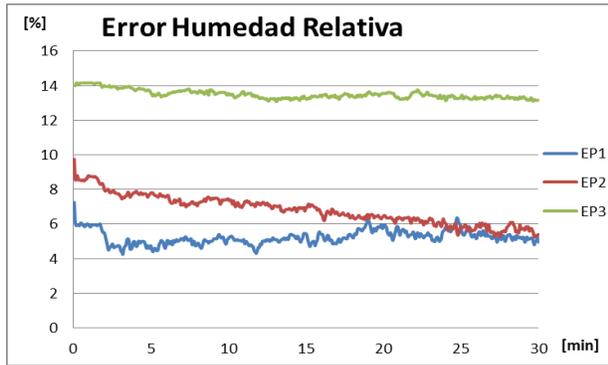
b)



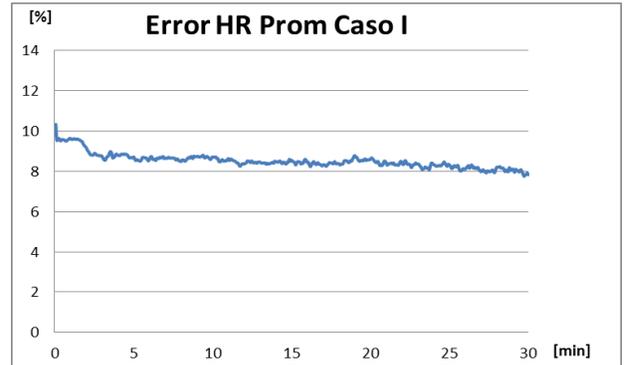
c)



d)



e)



f)

Figura 4.9 – Análisis de cambios de humedad relativa en las pruebas del Caso I

## CASO II

Esta prueba consistió en el monitoreo del sistema, buscando el calentamiento de la cabina al igual que en el Caso I, pero con la diferencia de que se buscó observar el comportamiento del sistema sin un usuario dentro del vehículo.

Durante la realización de estas pruebas, se llevaron a cabo únicamente los pasos establecidos en el protocolo general.

Para las tres pruebas se establecieron como valores a alcanzar una temperatura entre 30 y 32°C, humedad relativa entre 40 y 45% y un límite de 1500 ppm para la concentración de dióxido de carbono.

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante las tres pruebas realizadas siguiendo el procedimiento del Caso II.

### Prueba 1:

Al inicio de la prueba se registraron condiciones ambientales en el exterior de la cabina con valor de 24.9°C de temperatura y de 37.1% de humedad relativa, así como 25.4°C de temperatura y 30.6% de humedad relativa en el interior.

Al término de la prueba, las condiciones exteriores fueron de 25.3°C de temperatura y 38.8% de humedad relativa, mientras que se obtuvieron una temperatura de **26.95°C** y una concentración de **31.2%** de humedad relativa en las condiciones del interior.

La Tabla 4.4 y la Figuras 4.10 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 1		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	25.4	30.6
3	25.65	32.1
6	26.15	32.2
9	26.5	31.6
12	26.75	31.25
15	26.9	31.15
18	26.95	31.6
21	27	31.85
24	26.9	31
27	26.9	31.3
30	26.95	31.2

Tabla 4.4 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso II

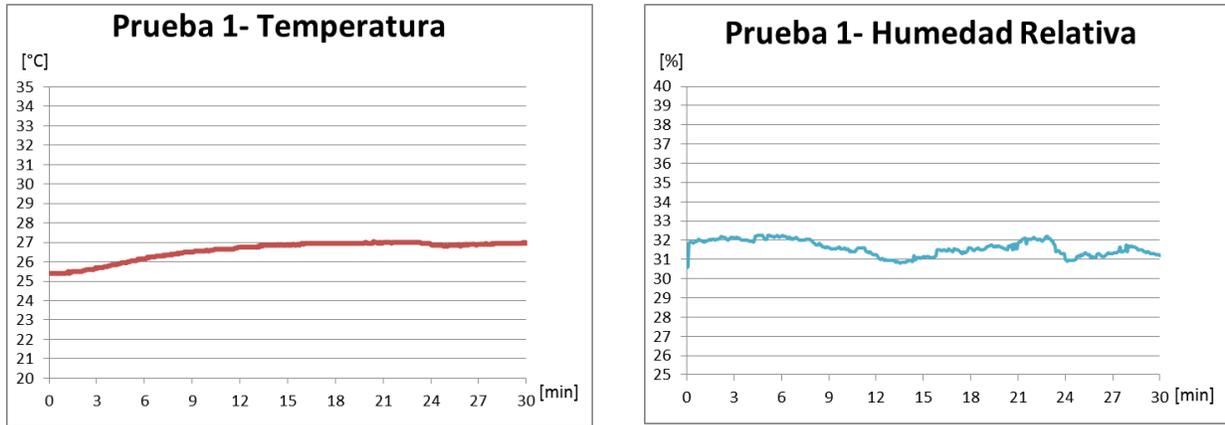


Figura 4.10 – Variaciones de temperatura en la Prueba 1 del Caso II

### Prueba 2:

Las condiciones ambientales al inicio de la prueba tuvieron los siguientes valores: 29.9°C de temperatura y de 29.1% de humedad relativa en el exterior de la cabina, así como 28.45°C de temperatura y 25.8% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Las condiciones finales en el exterior fueron de 29.7°C de temperatura y 28.7% de humedad relativa, mientras que en las condiciones del interior en la temperatura, los valores obtenidos fueron de **28.15°C** de temperatura y **26.05%** de humedad relativa.

La Tabla 4.5 y la Figura 4.11 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 2		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	28.45	25.8
3	28.35	25.85
6	28.3	25.85
9	28.3	25.75
12	28.3	25.45
15	28.3	25.65
18	28.25	25.75
21	28.2	26
24	28.3	25.65
27	28.2	25.8
30	28.15	26.05

Tabla 4.5 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso II

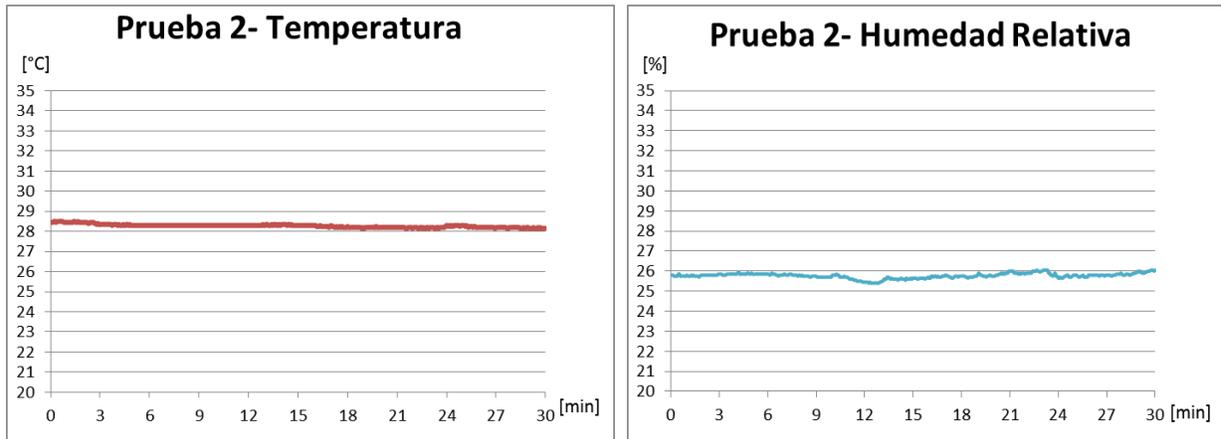


Figura 4.11 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso II

### Prueba 3:

Los valores de las condiciones ambientales iniciales en el exterior de la cabina fueron de 29.4°C y de 28.7%, para la temperatura y humedad relativa, respectivamente, mientras que en el interior se leyeron valores de 28.3°C de temperatura y 26.05% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Las condiciones exteriores al final de la prueba fueron de 29.2°C de temperatura y 28.2% de humedad relativa, mientras que en las condiciones del interior se obtuvo una temperatura de **29.75°C**, así como un valor de humedad relativa de **25.25%**.

La Tabla 4.6 y la Figura 4.12 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 3		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	28.3	26.05
3	28.1	26.15
6	27.85	26.15
9	27.7	26.15
12	27.7	25.8
15	28.35	25.6
18	29.2	25.1
21	29.55	25.1
24	29.75	25.2
27	29.75	25.05
30	29.75	25.25

Tabla 4.6 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso II

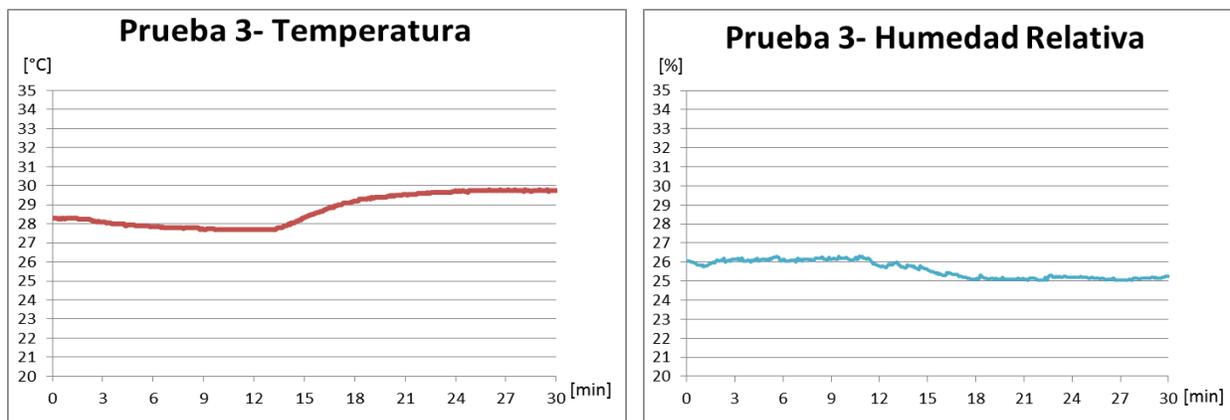


Figura 4.12 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso II

La Figura 4.13c muestra la gráfica de las curvas normalizadas de la variación de temperatura con respecto al valor inicial que se presentó durante cada prueba realizada en el Caso II. De esta gráfica se puede observar que a pesar de que el comportamiento de las Pruebas 1 y 3 muestran variaciones muy distintas, el valor final del **incremento** alcanzado fue bastante parecido, siendo de **1.55°C** para la Prueba 1 y **1.45°C** para la Prueba 2. Por otra parte, la variación de la Prueba 2 presentó una **disminución** de **0.3°C**, mientras que el valor máximo alcanzado por la variación del promedio de las tres pruebas (Figura 4.13d) presenta un **incremento** de **0.9°C**. En este caso, al comparar la gráfica de la variación con la gráfica de las tres respuestas de las pruebas y el promedio en relación con el valor esperado, mostrada en la Figura 4.13a), se observa que la magnitud de las variaciones no presenta una relación directa con la diferencia que había entre el valor inicial de cada prueba y el valor objetivo.

De las gráficas mostradas en los incisos e) y f) de la figura 4.13, que ilustran los valores de error con respecto al acercamiento del sistema al valor objetivo, se observa que el valor **mínimo** de **error**, de **0.25°C**, se obtuvo al final de la Prueba 3, mientras que el **máximo** valor de **error** fue de **3.05°C**, obtenido en la Prueba 1. La Prueba 2 mantuvo un error menor a 2°C, siendo de **1.85°C** el valor obtenido al final de la prueba. Con respecto a la gráfica correspondiente al **promedio**, se observa que el valor **mínimo** de **error** obtenido fue de **1.72°C**. Si bien la Prueba 1 obtuvo el mayor valor de error, fue también la prueba en la que se obtuvo el mayor valor de variación, con respecto al valor inicial.

En el caso de la variación del valor de humedad relativa con respecto al valor inicial, como se puede observar en la Figura 4.14c, aunque hubo cambios en el valor de la humedad relativa durante las pruebas, los valores finales de variación fueron casi despreciables, ya que, si bien se alcanzaron valores de variación de aproximadamente **1.5%** durante la Prueba 1, se consideró como valor máximo el obtenido al final de la misma, donde el **incremento** que se presentó fue de tan solo **0.6%**, con respecto al valor inicial. En la Prueba 2 se presentó un **incremento** de **0.25%**, mientras que en la Prueba 3, la variación presenta un valor negativo, es decir, una **disminución** de **0.8%**. El valor promedio de variación para el Caso II presenta un **incremento** de **0.02%**.

Con respecto al análisis del error, que se presenta en la gráfica de la Figura 4.14e, se observa la gran diferencia que presentó el sistema con respecto al valor final esperado, siendo el **mínimo** valor de **error** de **8.8%** de humedad relativa, observado en la Prueba 1, así como un valor de **13.95%** de error en la Prueba 2 y siendo el **máximo** valor de **error** el obtenido en la Prueba 3, de **14.75%** de humedad relativa distante del valor esperado. El valor de **error** observado en la gráfica del **promedio** (Figura 4.14f) es de **12.5%**.

Tanto en las gráficas de variación como en las gráficas del error, se observa que, con respecto a la humedad relativa, el sistema presentó un comportamiento opuesto al esperado durante las pruebas realizadas siguiendo el Protocolo II, además que las curvas obtenidas durante estas pruebas muestran un comportamiento irregular y menos lineal que aquellas obtenidas en el Caso I.

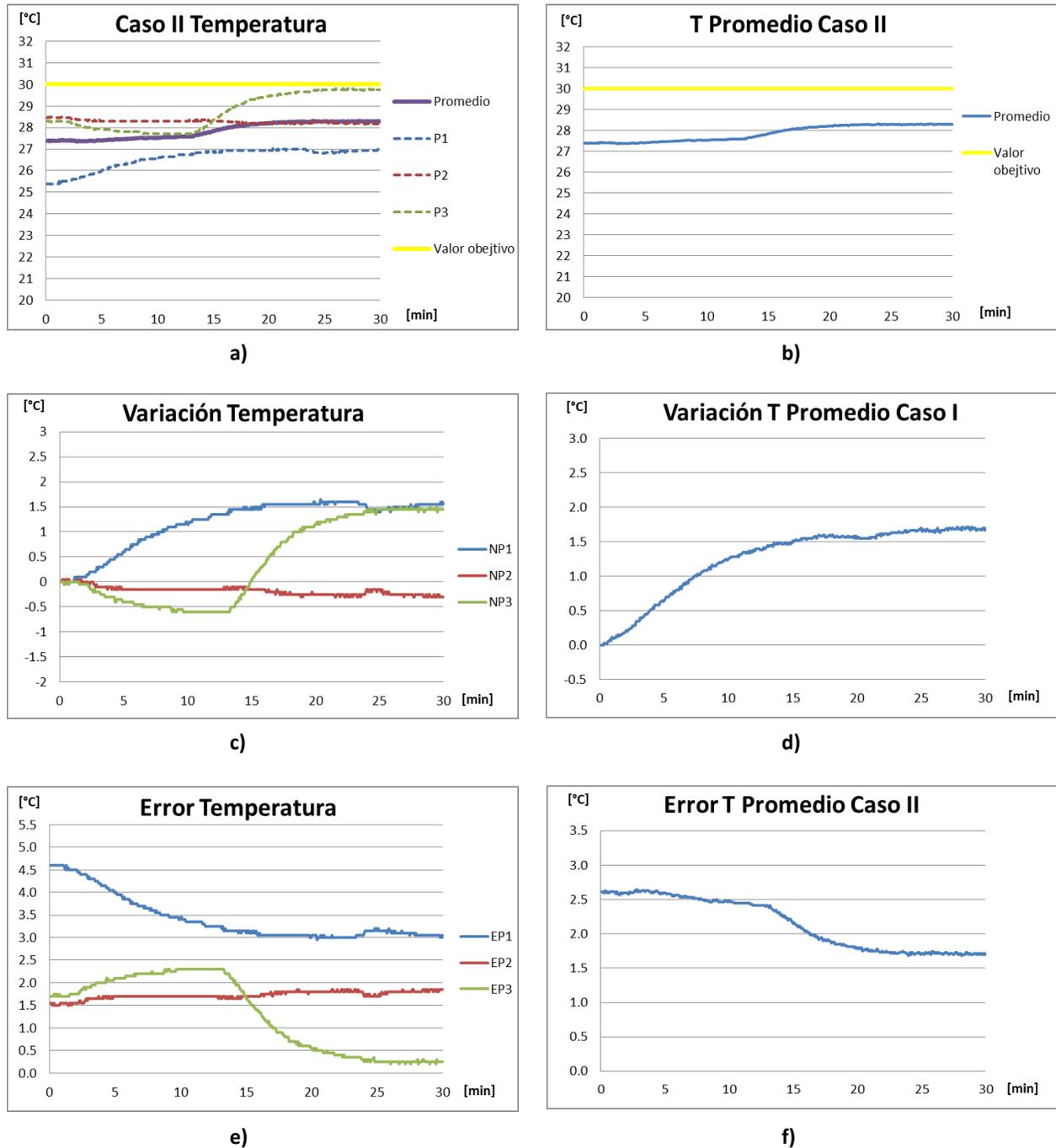
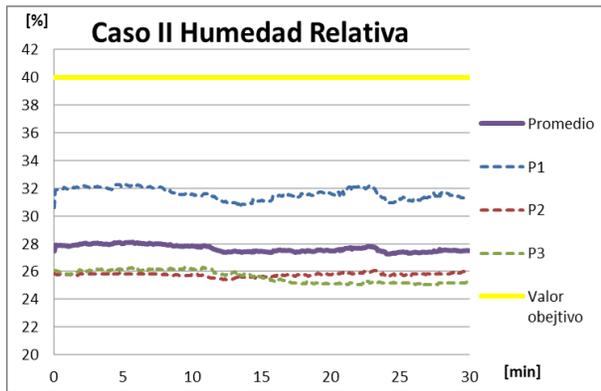
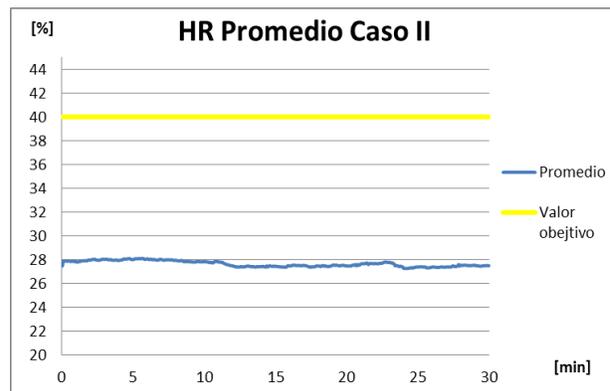


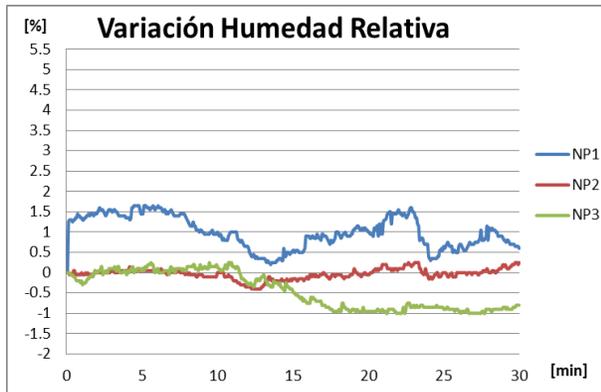
Figura 4.13 – Análisis de cambios de temperatura en las pruebas del Caso II



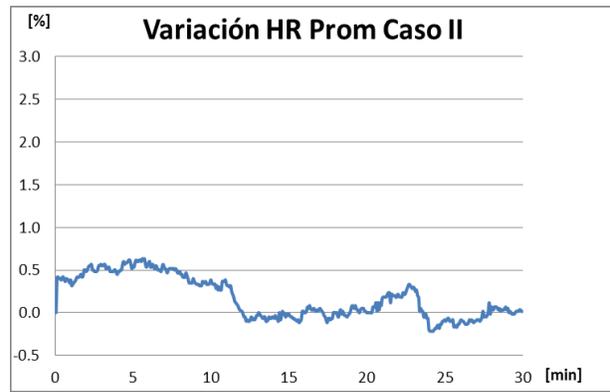
a)



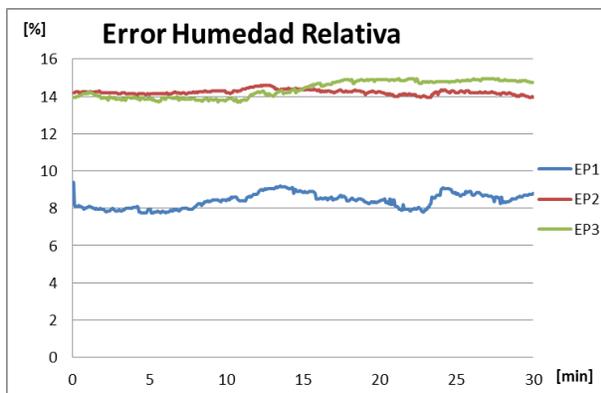
b)



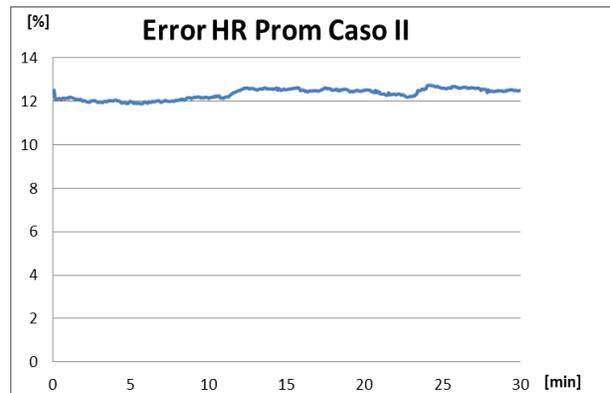
c)



d)



e)



f)

Figura 4.14 – Análisis de cambios de humedad relativa en las pruebas del Caso II

## CASO III

En esta prueba se buscó modificar las variables interiores de manera que se alcanzara una temperatura inferior a la que se encontraba el sistema, es decir su enfriamiento, monitoreando su comportamiento con un usuario dentro de la cabina del vehículo. Se siguieron los pasos mencionados en el Protocolo I, especificados para las pruebas con el usuario, además de los pasos del protocolo general.

Para las tres pruebas se establecieron como valores a alcanzar una temperatura entre 21 y 24°C, humedad relativa entre 40 y 45% y un límite de 1500 ppm para la concentración de dióxido de carbono.

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante las tres pruebas realizadas siguiendo el procedimiento para el Caso III.

### Prueba 1:

Al inicio de la prueba se registraron los siguientes valores de condiciones ambientales en el exterior de la cabina: temperatura de 25.2°C y humedad relativa de 38.2%, y en el interior: temperatura de 26.7°C y humedad relativa de 31.75%.

Al finalizar la prueba, las condiciones exteriores fueron: temperatura de 25.6°C y humedad relativa de 37.2%, y condiciones interiores de temperatura de **27.7°C** y humedad relativa de **37%**.

Los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba se muestran en la Tabla 4.7 y la Figura 4.15.

Prueba 1		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	26.7	31.75
3	27.1	34.4
6	27.25	35.25
9	27.3	36.4
12	27.65	35.85
15	27.6	36.4
18	27.7	36.5
21	27.6	36.6
24	27.7	36.45
27	27.7	36.55
30	27.7	37

Tabla 4.7 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso III

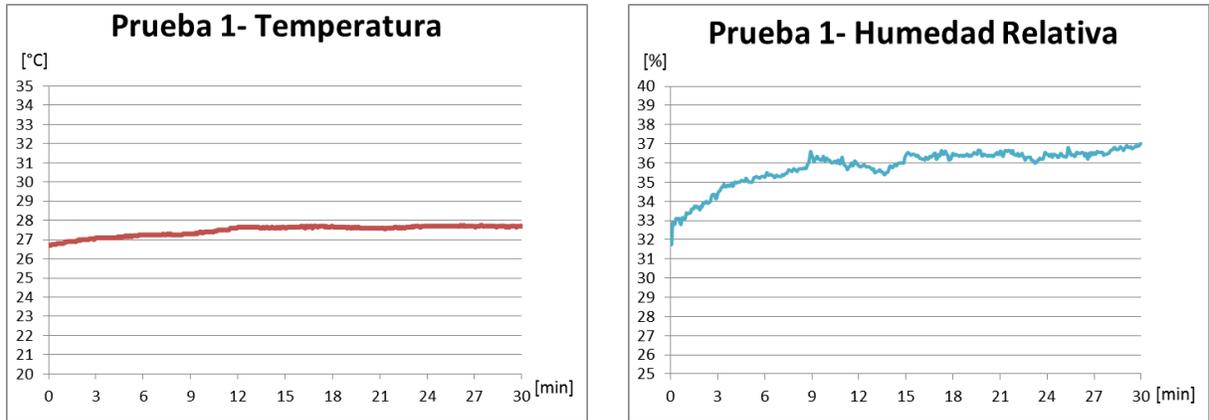


Figura 4.15 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso III

### Prueba 2:

Las condiciones ambientales iniciales fueron de 30.9°C y 27.4% en la temperatura y humedad relativa en el exterior, respectivamente, y de 29°C de temperatura y 26.6% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Una vez transcurridos los 30 minutos de la prueba, las condiciones exteriores fueron: temperatura de 30.4°C y humedad relativa de 27.9%, mientras que en el interior de la cabina, la temperatura obtenida fue de **28.7°C** y la humedad relativa de **26.25%**.

La Tabla 4.8 y la Figura 4.16 muestran los cambios de las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 2		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	29	26.6
3	28.95	26.55
6	28.85	26.15
9	28.85	26
12	28.8	25.55
15	28.75	25.65
18	28.75	25.65
21	28.75	25.85
24	28.7	25.9
27	28.65	26.05
30	28.7	26.25

Tabla 4.8 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso III

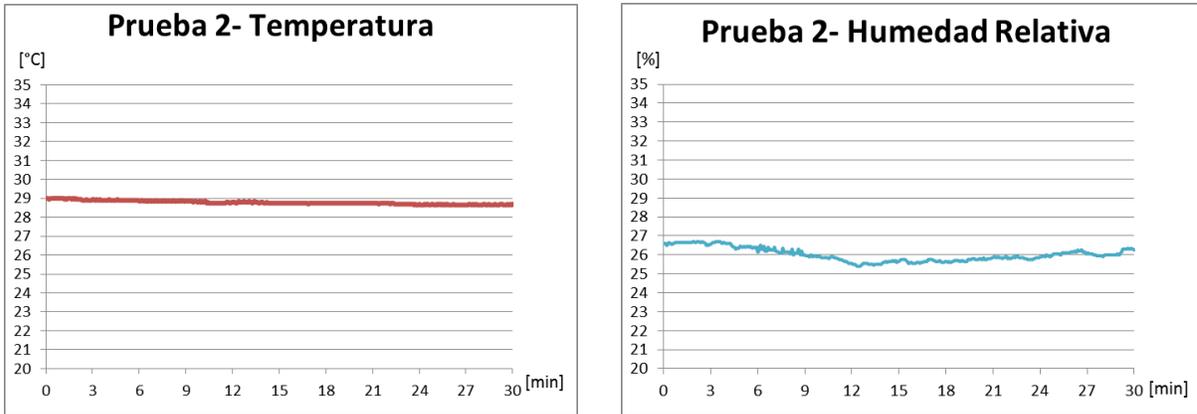


Figura 4.16 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso III

### Prueba 3:

Los valores de las condiciones ambientales iniciales para esta prueba fueron de: 28.1°C de temperatura y 29% de humedad relativa en el exterior de la cabina, y de 28.15°C de temperatura y 26% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Después de 30 minutos, las condiciones exteriores fueron de 27.8°C de temperatura y 28.7% de humedad relativa. En el interior de la cabina se obtuvo una temperatura de **27.75°C** así como un valor de **26.2%** de humedad relativa.

La Tabla 4.9 y la Figura 4.17 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 3		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	28.15	26
3	28.15	26.65
6	28.45	26.85
9	28.65	27.1
12	28.3	26.45
15	28	26.55
18	27.95	26.55
21	27.85	26.4
24	27.95	26.55
27	27.9	26.35
30	27.75	26.2

Tabla 4.9 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso III

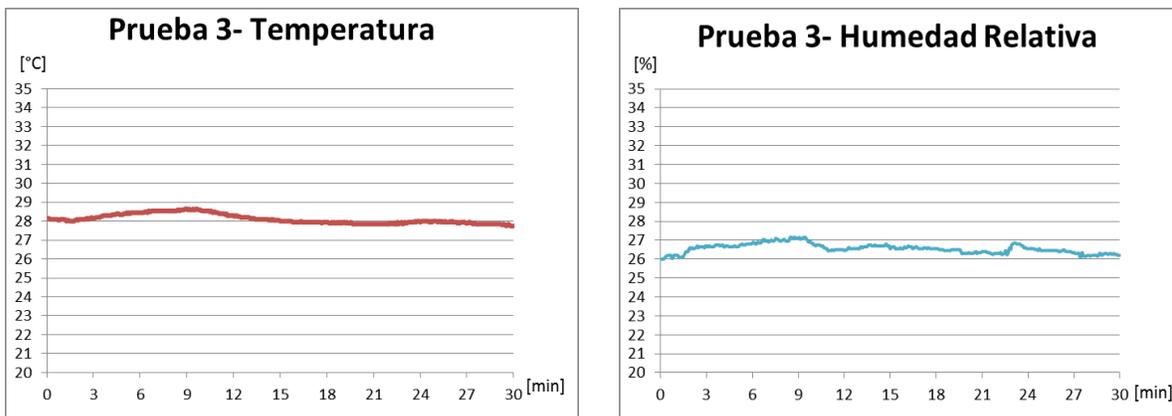


Figura 4.17 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso III

Como se puede observar en la gráfica de la Figura 4.18c, que presenta la variación de la temperatura obtenida durante las pruebas del Caso III, el valor máximo de variación se registró en la Prueba 1, donde se obtuvo un **incremento** de **1°C**, seguido por una **disminución** de **0.4°C** registrado en la Prueba 3, mientras que en la Prueba 2 se registró una **disminución** de temperatura de **0.3°C**. La curva mostrada en la gráfica de la Figura 4.18d, que representa el comportamiento del **promedio** del Caso III, muestra un **incremento** de **0.1°C**.

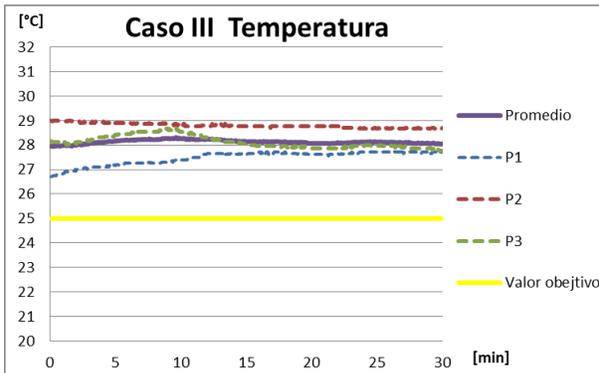
Por otra parte, las gráficas de los incisos e) y f) de la Figura 4.18, que presentan el análisis respecto al valor de error, o la capacidad del sistema en cada prueba para acercarse al valor esperado, se observa que en general, el sistema se mantuvo siempre en un valor aproximado de **3°C** alejado del objetivo, siendo **3.05°C** el valor de **error promedio**. Asimismo, el **mínimo error** fue de **2.7°C**, alcanzado durante la Prueba 3, seguido de **2.75°C** en la Prueba 1, mientras que el **error máximo** se presentó en la Prueba 2, con un valor de **3.7°C**.

En la gráfica de la Figura 4.19c se ilustra la variación de la humedad relativa durante las pruebas del Caso III, donde se puede observar que el valor **máximo** de **variación** se registró en la Prueba 1, donde se presentó un **incremento de 5.25%**, mientras que el valor **mínimo** se presentó en la **disminución** de **0.35%** registrado en la Prueba 3. Asimismo, en la Prueba 3 se presentó un **incremento** con valor de **0.2%**, de manera que el valor de la **variación** del **promedio** presentó un **incremento** de tan sólo **1.7%**.

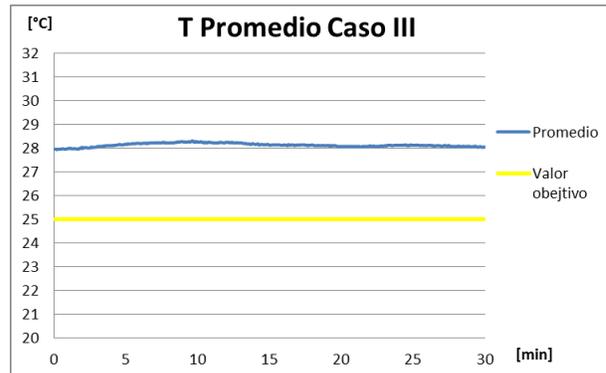
Asimismo, los resultados del análisis de error, mostrados en las gráficas de las Figuras 4.19e y 4.19f, muestran un valor **mínimo** de **error** de **3%** de humedad relativa, observado al final de la Prueba 1, mientras que las Pruebas 2 y 3 presentaron errores de **13.75%** y **13.8%**, respectivamente. El valor de **error** del **promedio** de las tres pruebas fue de **10.18%** de humedad relativa.

Comparando las gráficas de variación y error con la gráfica del comportamiento de las tres pruebas y el promedio con respecto al valor objetivo, mostrada en la Figura 4.19a, se observa que tanto la variación de mayor valor como el valor mínimo de error corresponden a la Prueba 1, cuyo valor inicial se encontraba mucho más cerca del objetivo que en las otras dos pruebas.

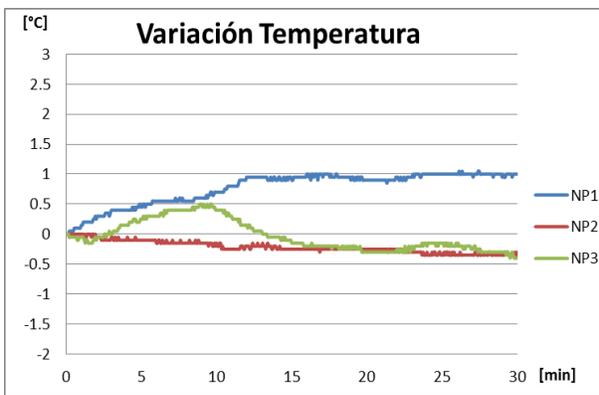
Asimismo, el comportamiento de la variable humedad relativa presentó menos irregularidad que en las pruebas del Caso II.



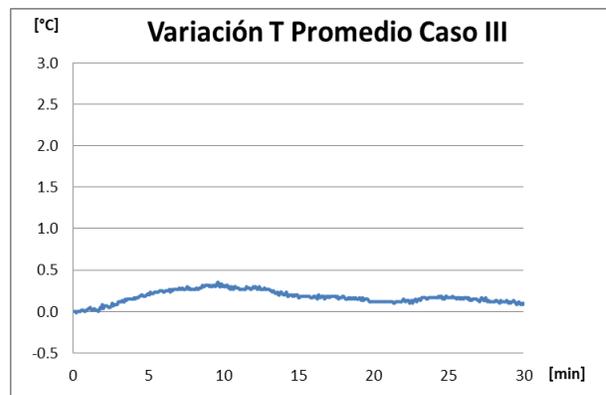
a)



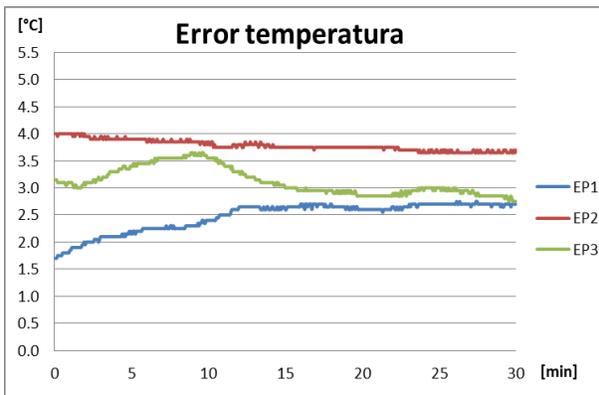
b)



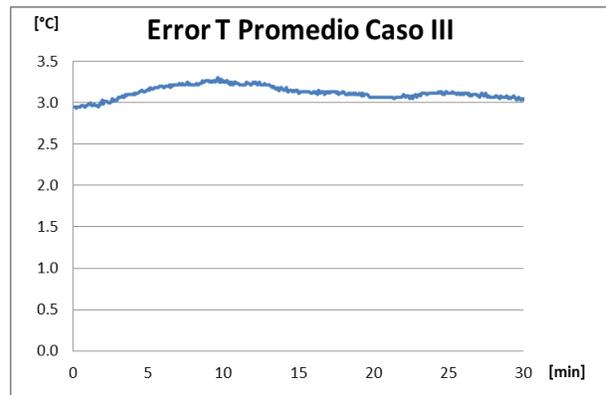
c)



d)

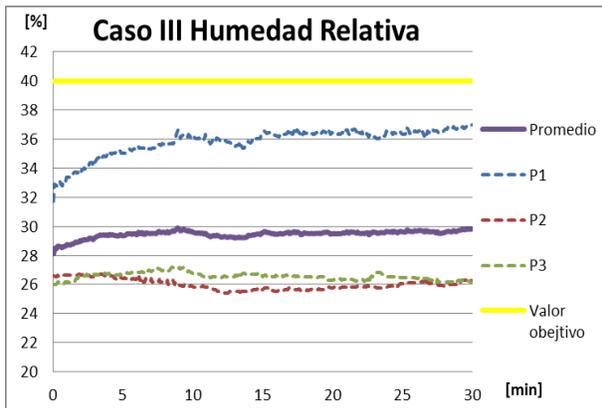


e)

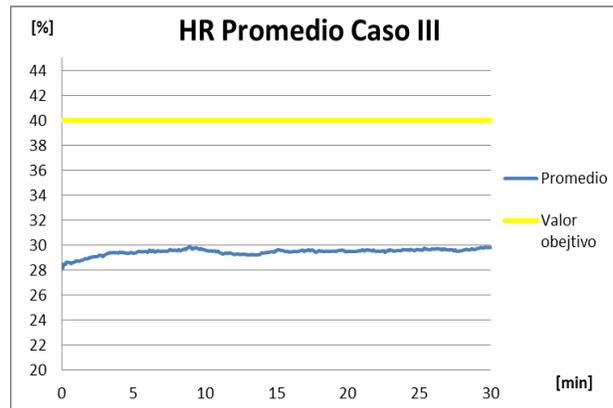


f)

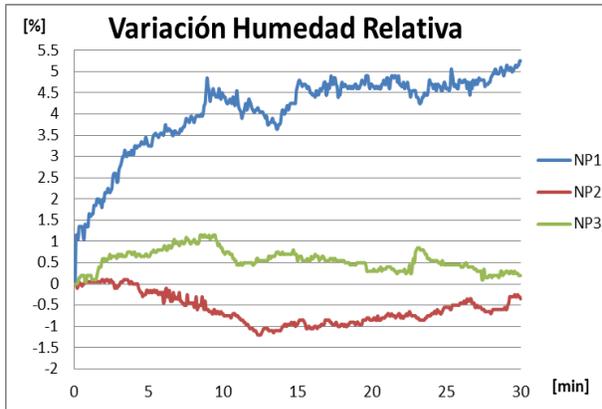
Figura 4.18 – Análisis de cambios de temperatura en las pruebas del Caso III



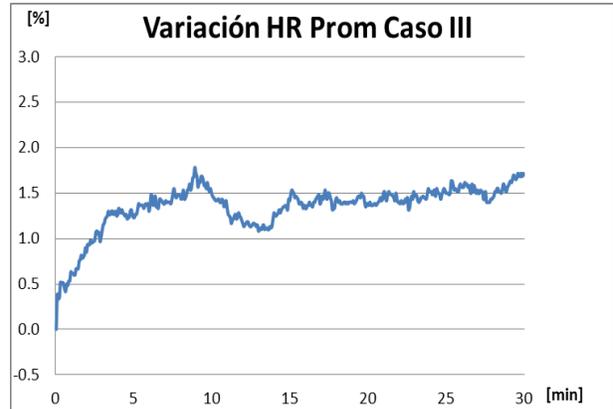
a)



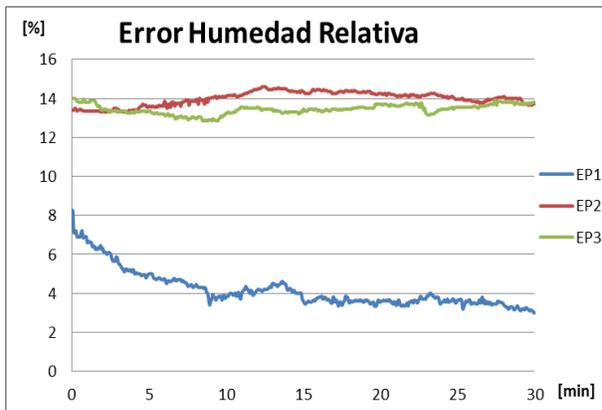
b)



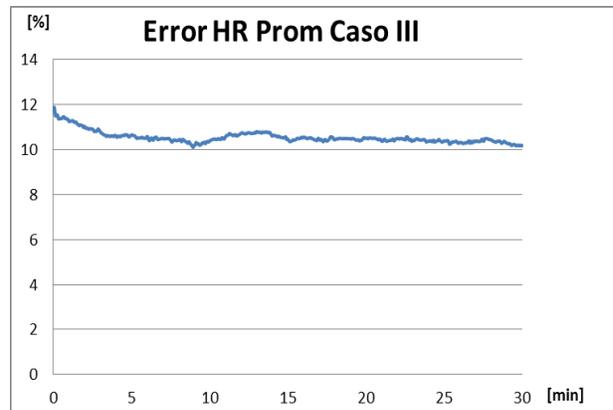
c)



d)



e)



f)

Figura 4.19 – Análisis de cambios de humedad relativa en las pruebas del Caso III

## CASO IV

En esta prueba, al igual que en el Caso III, se buscó enfriar el sistema, disminuyendo la temperatura en el interior de la cabina, pero observando el comportamiento sin un usuario dentro. Al igual que en el Caso II, no fueron necesarios más pasos que los especificados en el protocolo general.

Para las tres pruebas se establecieron como valores a alcanzar una temperatura entre 21 y 24°C, humedad relativa entre 40 y 45% y un límite de 1500 ppm para la concentración de dióxido de carbono.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante las tres pruebas realizadas siguiendo el Protocolo IV (disminución de la temperatura, así como el incremento de la humedad relativa dentro de la cabina, sin usuario dentro del vehículo).

### Prueba 1:

Al inicio de la prueba se registraron condiciones ambientales de 25.3°C de temperatura y de 38.4% de humedad relativa en el exterior de la cabina, así como 26°C de temperatura y 30.4% de humedad relativa en el interior.

Las condiciones exteriores al finalizar la prueba fueron de 24.9°C de temperatura y 37.1% de humedad relativa, mientras que en las condiciones del interior fueron de **26.05°C** de temperatura y **34.05%** de humedad relativa.

La Tabla 4.10 y la Figura 4.20 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 1		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	26	30.4
3	26.3	32.3
6	26.4	32.95
9	26.4	33.45
12	26.4	33.3
15	26.35	33.2
18	26.3	33.65
21	26.25	33.95
24	26.15	34.2
27	26.15	33.9
30	26.05	34.05

Tabla 4.10 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso IV

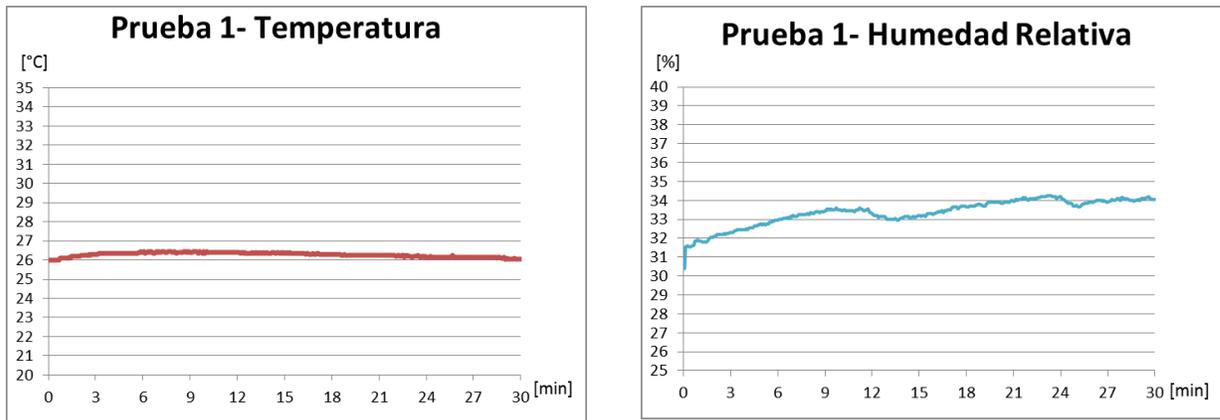


Figura 4.20 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 1 del Caso IV

### Prueba 2:

Las condiciones ambientales al inicio de la prueba tuvieron los siguientes valores: 31.8°C de temperatura y de 23.1% de humedad relativa en el exterior de la cabina, así como 30.3°C de temperatura y 25% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Las condiciones finales en el exterior fueron de 31.3°C de temperatura y 28% de humedad relativa, mientras que en las condiciones del interior tuvieron un valor de **29.1°C** de temperatura y **25.3%** de humedad relativa.

Los cambios presentados durante esta prueba en las variables temperatura y humedad relativa se muestran en la Tabla 4.11 y la Figura 4.21.

Prueba 2		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	30.3	25
3	29.7	24.75
6	29.45	24.75
9	29.4	25.15
12	29.4	25.15
15	29.4	25.15
18	29.35	25.15
21	29.3	25.35
24	29.15	25.25
27	29.15	25.35
30	29.1	25.3

Tabla 4.11 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso IV

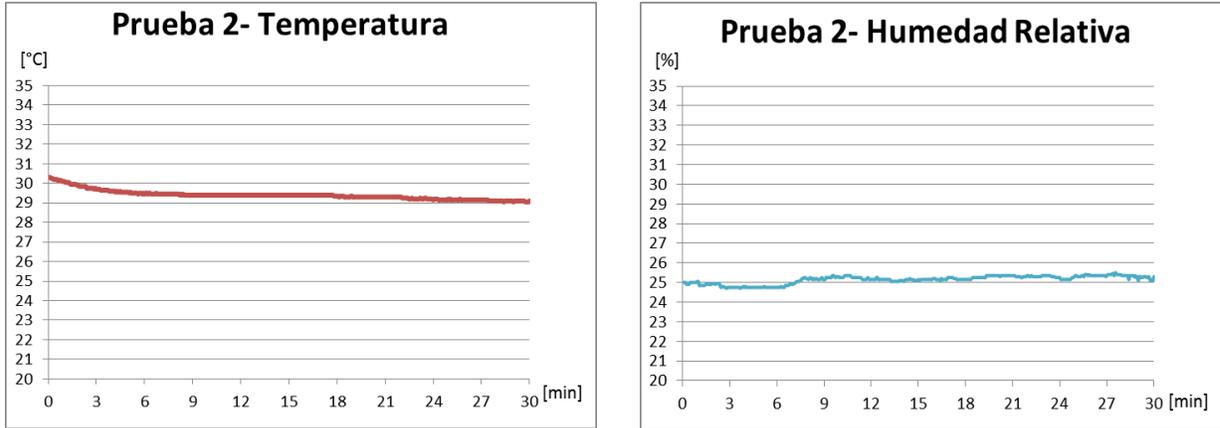


Figura 4.21 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 2 del Caso IV

### Prueba 3:

Los valores de las condiciones ambientales iniciales para esta prueba fueron de: 27.7°C de temperatura, 28.9% de humedad relativa en el exterior de la cabina, y de 27.7°C de temperatura, 25.4% de humedad relativa en el interior de la cabina.

Después de 30 minutos, las condiciones exteriores fueron de 27.3°C de temperatura y 29.2% de humedad relativa. En el interior de la cabina se obtuvo una temperatura de **26.35°C**, así como un valor de **26.2%** de humedad relativa.

La Tabla 4.12 y la Figura 4.22 muestran los cambios presentados en las variables temperatura y humedad relativa durante esta prueba.

Prueba 3		
Tiempo [m]	Temp [°C]	HR [%]
0	27.7	25.4
3	27.4	25.75
6	27.15	26
9	27	25.9
12	26.85	25.85
15	26.8	25.8
18	26.7	25.9
21	26.6	26.05
24	26.5	26.05
27	26.45	26.2
30	26.35	26.2

Tabla 4.12 –Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso IV

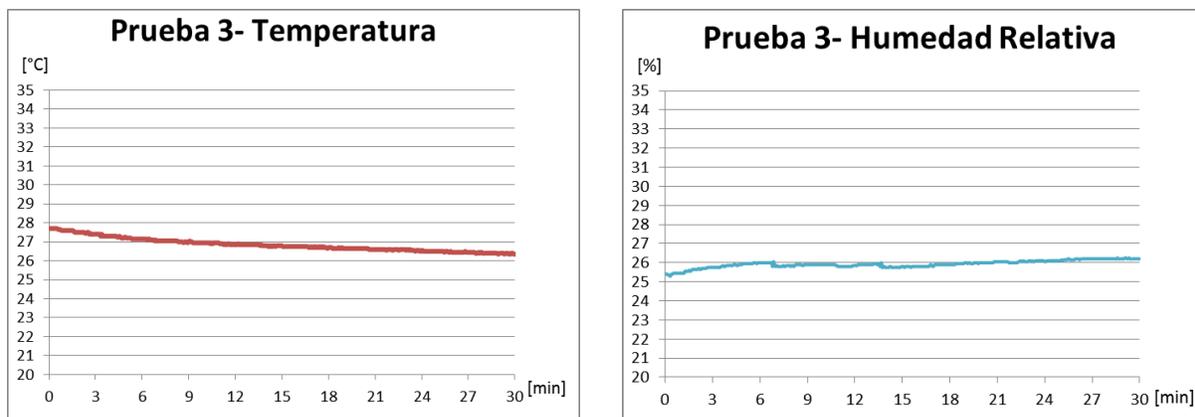


Figura 4.22 – Variaciones de temperatura y humedad relativa en la Prueba 3 del Caso IV

En cuanto a la variación de la temperatura durante las pruebas del Caso IV, cuya gráfica se muestra en el inciso c) de la Figura 4.23, se observa que el valor máximo de variación se registró en las Pruebas 2 y 3, donde se obtuvieron **disminuciones** de **1.2°C** y **1.35°C**, respectivamente, mientras que en la Prueba 1 se obtuvo un **incremento** de **0.05°C**. El comportamiento del **promedio** del Caso IV, mostrado en la gráfica de la Figura 4.23d, presenta una **disminución** de **0.83°C**.

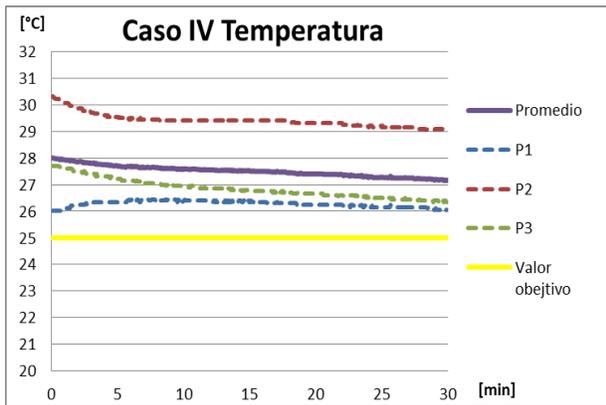
Por otra parte, del análisis respecto al valor de error, ilustrado en las gráficas de los incisos e) y f) de la Figura 4.23, se puede observar que la Prueba 2 presentó el menor acercamiento al valor objetivo, teniendo el valor **máximo** de **error**, de **4.1°C**. Asimismo, a pesar de que las Pruebas 1 y 3 presentaron valores de error similares, de **1.05°C** y **1.35°C** respectivamente, se observa que el comportamiento de la Prueba 3 fue más parecido al de la Prueba 2, ya que en ambas pruebas el error fue disminuyendo, mientras que en la Prueba 1, el valor del error incrementó hacia el final de la prueba. Para el Caso IV, se obtuvo un valor de **error promedio**, de **2.17°C**.

Con respecto a la variable humedad relativa, las gráficas correspondientes al análisis de la variación con respecto al valor inicial se muestran en la Figura 4.24c, donde se puede observar que el valor **máximo** se registró en la Prueba 1, donde se presentó un **incremento** de **2.97%**, seguido de **incrementos** menores, con valor de **0.15%** y **0.53%** en las Prueba 2 y 3, respectivamente. El valor de la **variación** del **promedio** presentó un **incremento** de aproximadamente **1.58%** de humedad relativa.

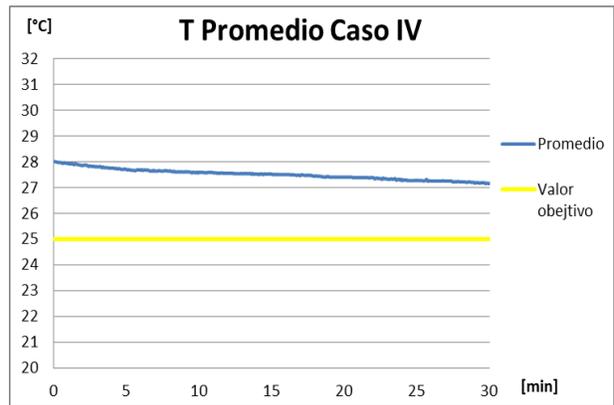
Asimismo, en las gráficas de los incisos e) y f) de la Figura 4.24 se presentan los valores de error, es decir, la diferencia con respecto al valor objetivo, obtenidos durante las pruebas del Caso IV, donde el **mínimo** valor de **error**, de **5.95%** de humedad relativa, se obtuvo al final de la Prueba 1, mientras que el **máximo** valor de **error**, obtenido en la Prueba 2, fue de **14.7%**. El valor de **error** registrado en la Prueba 3 fue de **13.8%**, mientras que el valor de **error** observado en la respuesta del **promedio** fue de **11.48%** humedad relativa distante del valor esperado.

Comparando las gráficas de variación y error con la gráfica del comportamiento de las tres pruebas y el promedio con respecto al valor objetivo, referente a la variable humedad relativa, mostrada en la Figura 4.24a, se observa que tanto los valores máximos de error como las variaciones más pequeñas corresponden a las pruebas cuyo valor inicial se encontraba más alejado del valor objetivo.

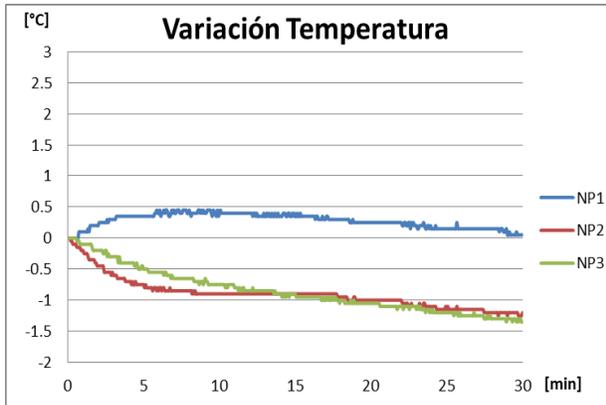
Sin embargo, dicha relación no se presenta en el caso de la temperatura, donde a pesar de que el menor error y menor variación pertenecen a la misma prueba, cuyo valor inicial estaba más alejado del objetivo, el comportamiento del sistema fue el opuesto al esperado.



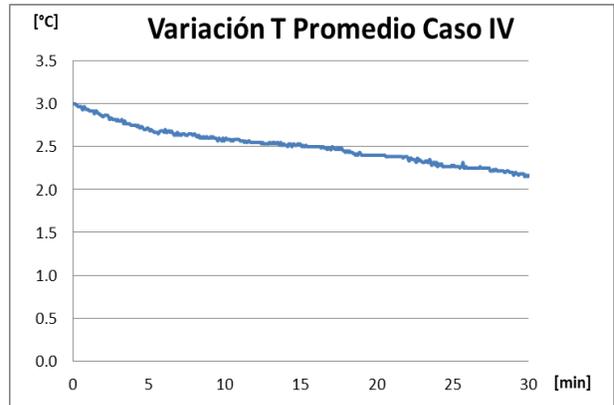
a)



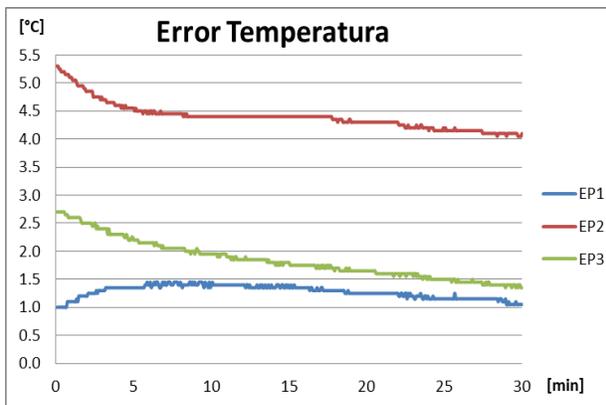
b)



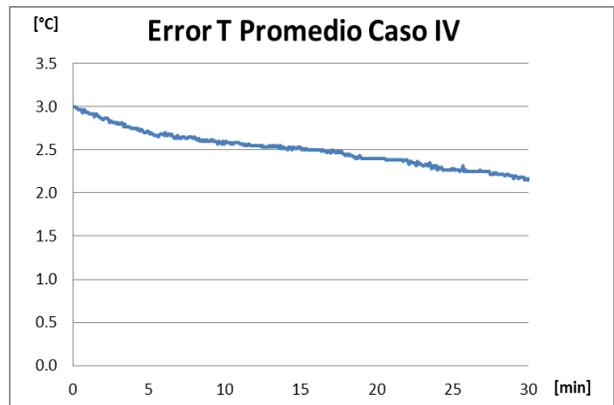
c)



d)

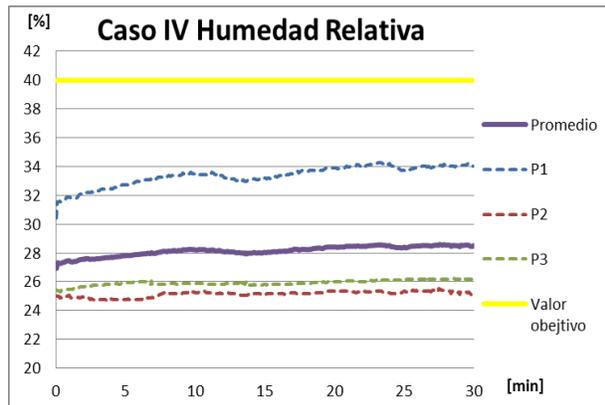


e)

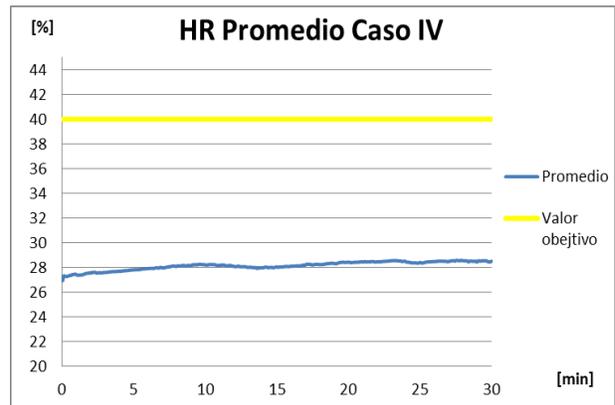


f)

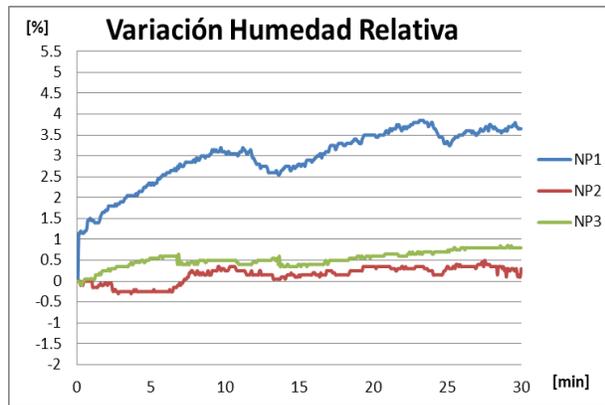
Figura 4.23 – Análisis de cambios de temperatura en las pruebas del Caso IV



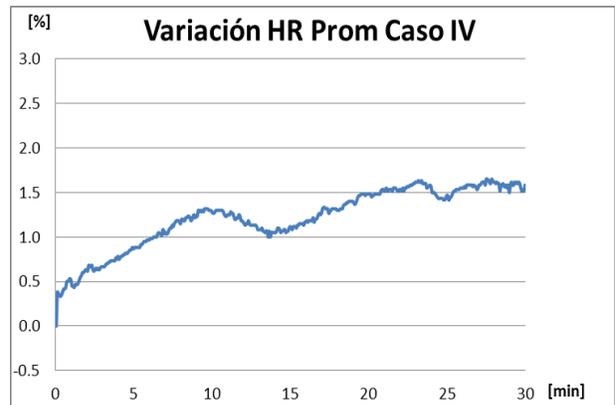
a)



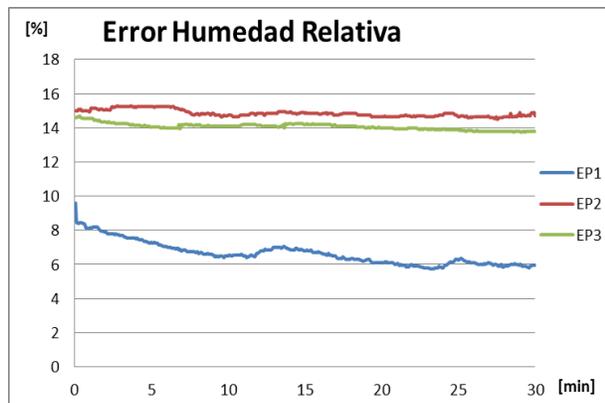
b)



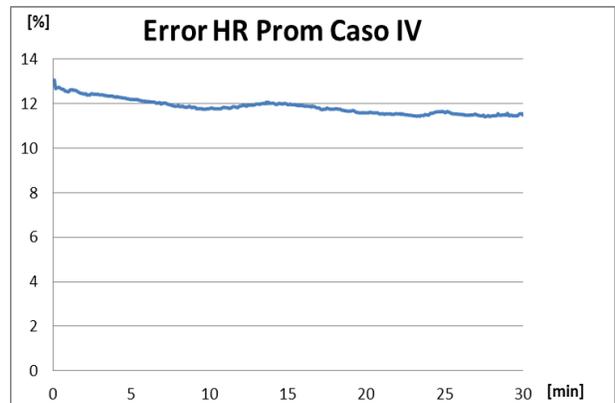
c)



d)



e)



f)

Figura 4.24 – Análisis de cambios de humedad relativa en las pruebas del Caso IV

Si bien las pruebas mencionadas anteriormente incorporaron la participación de los sistemas encargados tanto del monitoreo como de la modificación de las tres variables seleccionadas, en todas las pruebas se registró un problema con la lectura del sensor de CO<sub>2</sub>, de manera que se generaron otras pruebas para verificar que dicho sensor estuviera funcionando.

Se llevaron a cabo tres pruebas de verificación que consistieron en la conexión de sensor y, tras el tiempo de calentamiento, el registro de los valores leídos, probando el sensor en tres ambientes distintos: en el interior de una habitación, en el interior del vehículo con las ventanas cerradas (mismo procedimiento que se realizó en las pruebas para la calibración) y por último en el interior del vehículo con las ventanas generadas para las pruebas, que incluyen los ventiladores, los cuales fueron activados y desactivados de manera aleatoria para observar diferencias en el comportamiento del sensor.

Para dichas pruebas no se siguió ningún protocolo, no se estableció un tiempo determinado para la duración de cada prueba ni se registraron datos correspondientes a las condiciones exteriores, por lo que los resultados se anexan en el APÉNDICE E y no en la sección de resultados de este capítulo.

Una vez verificado el funcionamiento del sensor, se procedió a realizar una serie de pruebas para observar la respuesta del mismo en el ambiente en el que se llevaron a cabo las pruebas descritas por los Casos I, II, III y IV.

Para tales pruebas se siguieron los pasos del protocolo general en cuanto a la instalación del sistema y la realización de las pruebas, con la excepción de que para estas pruebas no se incorporaron los sistemas ni de monitoreo ni de modificación de las variables Temperatura y Humedad Relativa.

Estas cuatro pruebas se diferenciaron por emplear las ventanas del vehículo cerradas o las ventanas que incluyen los ventiladores así como la presencia o ausencia de un usuario dentro del vehículo, siendo identificadas de la siguiente manera:

- **Caso A:** Con ventanas cerradas y sin usuario dentro.
- **Caso B:** Con ventanas cerradas y con un usuario dentro.
- **Caso C:** Con ventiladores y sin usuario dentro.
- **Caso D:** Con ventiladores y con usuario dentro.

Se llevaron a cabo dos pruebas de cada tipo descrito anteriormente, dando un total de 8 pruebas, cuya duración fue de 30 minutos cada una.

En las pruebas realizadas con los ventiladores en las ventanas (Casos C y D) se estableció un límite de 1000 [ppm] como valor de referencia para la activación de los ventiladores. Las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa fueron observadas únicamente en el exterior, como referencia.

Para el análisis correspondiente a la concentración de CO<sub>2</sub>, se generaron las gráficas de *ajuste lineal y error*, donde el ajuste lineal se empleó para observar principalmente dos cosas: si se presentó o no un incremento en la concentración durante las pruebas y si qué tan semejantes fueron las respuestas en las dos pruebas correspondientes a cada protocolo. Asimismo, la gráfica de error se obtuvo de la misma manera que en el análisis de la temperatura y la humedad relativa, siendo éste el valor absoluto de la diferencia entre el valor objetivo (en este caso el límite permitido) y cada valor leído, de manera que representa que tanto se acercó el incremento de la concentración al límite establecido, en el tiempo de duración de las pruebas.

## CASO A

En este caso se buscó observar el comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> dentro de la cabina del automóvil cuando no se encontraba ningún usuario dentro y mientras el vehículo se encontraba cerrado completamente.

### Prueba 1:

Al inicio de esta prueba, con valores exteriores de 58.1% de humedad relativa, 19.8°C de temperatura y concentración de 455ppm, se registró un valor de **671ppm** de concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina.

Pasados los 30 minutos de la prueba, se registraron valores exteriores de 56.7% de humedad relativa, 20.1°C de temperatura y 447ppm de concentración de CO<sub>2</sub>, mientras que al interior de la cabina se registró una concentración de **671ppm**.

### Prueba 2:

En esta prueba, con valores exteriores de 66.1% de humedad relativa, 19.6°C de temperatura y concentración de 464ppm, se registró un valor de **606ppm** de concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina.

Los valores exteriores al final de la prueba fueron de 65.3% de humedad relativa, 19.4°C de temperatura y 452ppm de concentración de CO<sub>2</sub>, mientras que al interior de la cabina se registró una concentración de **671ppm**.

La Tabla 4.13 presenta la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> registrados durante las Pruebas 1 y 2 del Caso A. Asimismo, las gráficas correspondientes a dichas pruebas se muestran en la Figura 4.25.

CASO A		
Tiempo [min]	Prueba 1 [ppm]	Prueba 2 [ppm]
0	671	606
3	671	654
6	654	671
9	687	703
12	687	671
15	703	671
18	671	671
21	671	671
24	638	671
27	654	654
30	671	671

Tabla 4.13 –Variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso A

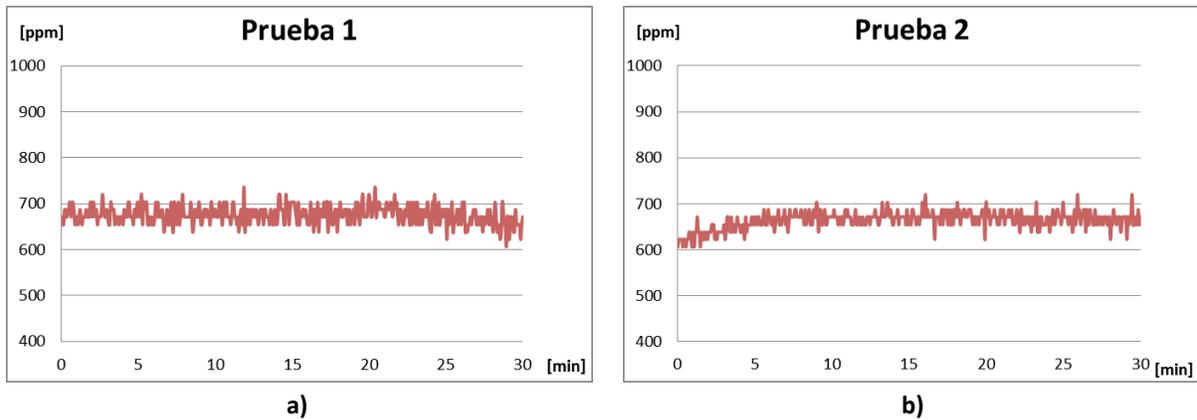


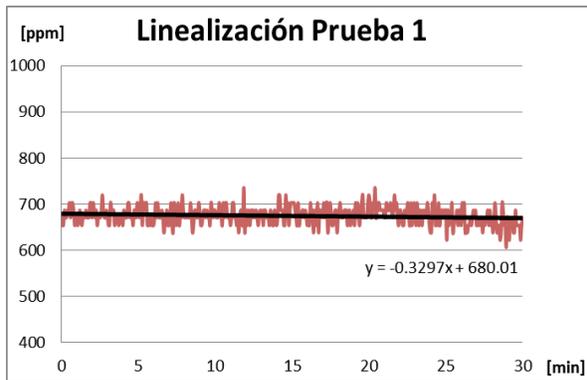
Figura 4.25 – Variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso A

En los incisos a), b) y c) de la Figura 4.26 se muestran las gráficas correspondientes a la obtención del ajuste lineal de las curvas de variación de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina durante las pruebas realizadas siguiendo el procedimiento del Caso A, así como de la curva del promedio de ambas pruebas.

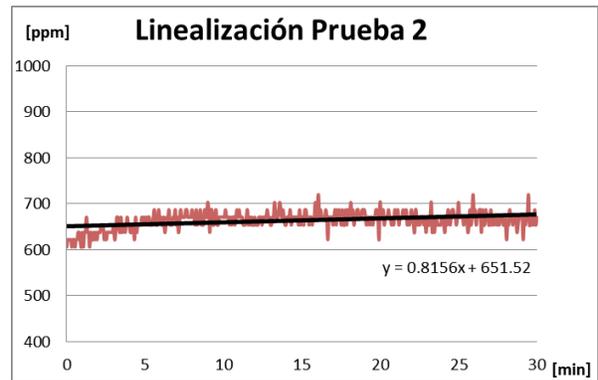
El comportamiento del ajuste lineal de las tres gráficas se resume en la gráfica de la Figura 4.26 d), dónde se puede apreciar que, si bien al se presenta una variación al inicio de cada una de las pruebas, presentando una disminución en el caso de la primera prueba y un incremento en el caso de la segunda, pasada la primera mitad de la prueba ambos comportamientos se establecen hacia el mismo comportamiento hasta el final de la prueba.

Con respecto a la linealización de la curva del promedio, se observa que el comportamiento generalizado para el Caso A es que no se presentó una variación considerable con respecto al valor inicial, es decir, no hubo un incremento perceptible en la concentración del CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina.

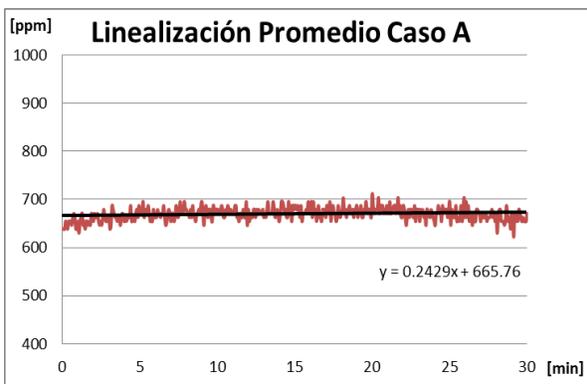
Por otra parte, los incisos e) y f) de la Figura 4.26 presentan las gráficas correspondientes al error, de ambas pruebas y del promedio, respectivamente. En dichas gráficas se aprecia que si bien el valor del error a lo largo de la prueba presentó algunas variaciones, entre el valor inicial y el valor final de la prueba no se presentó una disminución considerable con respecto al valor objetivo, ya que el valor inicial de error fue de 329, 394 y 361.5 ppm para la Prueba 1, Prueba 2 y Promedio, respectivamente, mientras que el valor final de error, en los tres casos fue de 329 ppm.



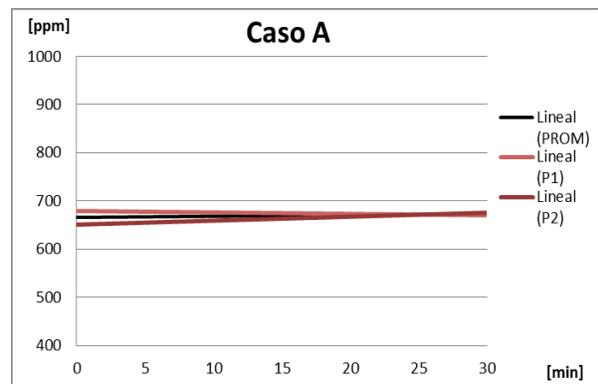
a)



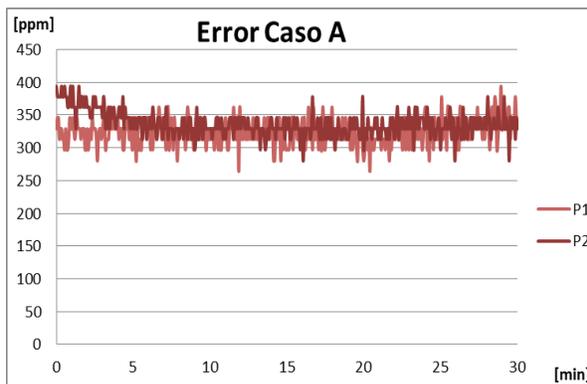
b)



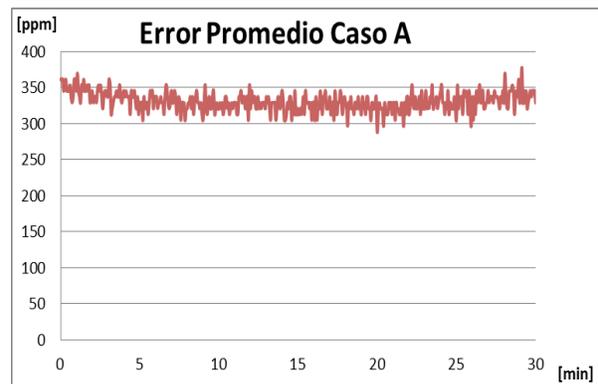
c)



d)



e)



f)

Figura 4.26 – Análisis de cambios de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso A

## CASO B

En este caso se buscó observar el comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> dentro de la cabina del automóvil cuando se encontraba un usuario en el interior, mientras el vehículo se encontraba cerrado completamente.

### Prueba 1:

Al inicio de esta prueba, con valores exteriores de 57.7% de humedad relativa, 20.3°C de temperatura y concentración de 458ppm, se registró un valor de **638ppm** de concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina.

Después de los 30 minutos de la prueba, se registraron valores exteriores de 66.4% de humedad relativa, 19.5°C de temperatura y 461ppm de concentración de CO<sub>2</sub>, mientras que al interior de la cabina se registró una concentración de **671ppm**.

### Prueba 2:

En esta prueba, con valores exteriores de 65.5% de humedad relativa, 19.4°C de temperatura y concentración de 450ppm, se registró un valor de **671 ppm** de concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina.

Al final de la prueba, los valores fueron de 64.1% de humedad relativa, 19.3°C de temperatura y 463ppm de concentración de CO<sub>2</sub> en el exterior de la cabina, mientras que al interior se registró una concentración de **703ppm**.

Los resultados de ambas pruebas se muestran en la Tabla 4.14, así como en las gráficas de la Figura 4.27.

CASO B		
Tiempo [min]	Prueba 1 [ppm]	Prueba 2 [ppm]
0	638	671
3	687	687
6	687	671
9	671	687
12	687	703
15	703	687
18	703	703
21	687	687
24	671	703
27	703	703
30	671	703

Tabla 4.14 –Variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso B

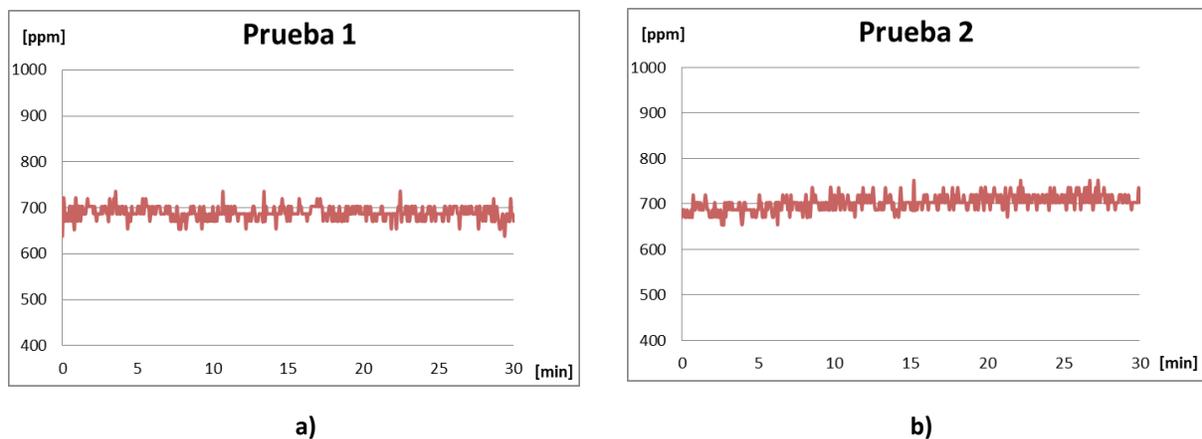


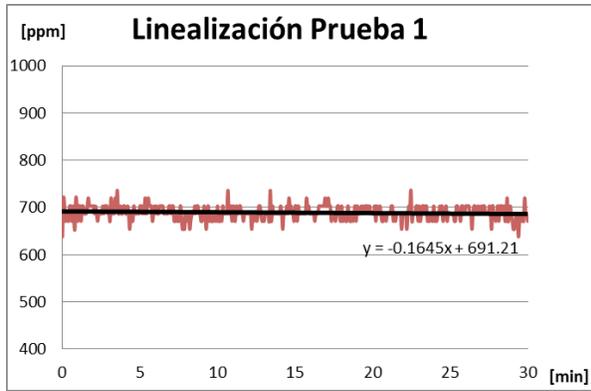
Figura 4.27 – Variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Protocolo B

En las Figuras 4.28a, 4.28b y 4.28c se muestran las gráficas correspondientes a la linealización de las curvas de variación de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina durante las pruebas realizadas siguiendo el procedimiento del Caso B, así como de la curva del promedio de ambas pruebas. Asimismo, el resumen de las tres gráficas se muestra en la Figura 4.28d.

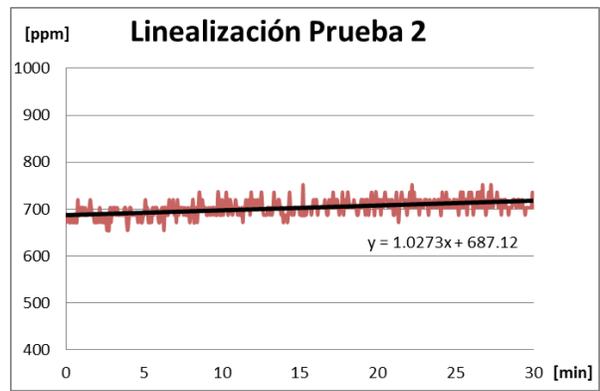
Si bien en la curva de la Prueba no se aprecia claramente, en la curva de la Prueba 2 y en la curva del Promedio se puede observar la diferencia en el comportamiento del sistema al encontrarse un pasajero en el interior de la cabina, pues aunque de valor pequeño, se puede observar la tendencia de crecimiento de la concentración de dióxido de carbono en el interior de la cabina hacia el final de la prueba.

Dicho incremento puede ser observado también a través del comportamiento ilustrado en las gráficas de los incisos e) y f) de la Figura 4.28, que representan la variación del valor de error en ambas pruebas y del promedio respectivamente, ya que, como se mencionó anteriormente, el valor del error tiene una relación inversamente proporcional al incremento en la concentración.

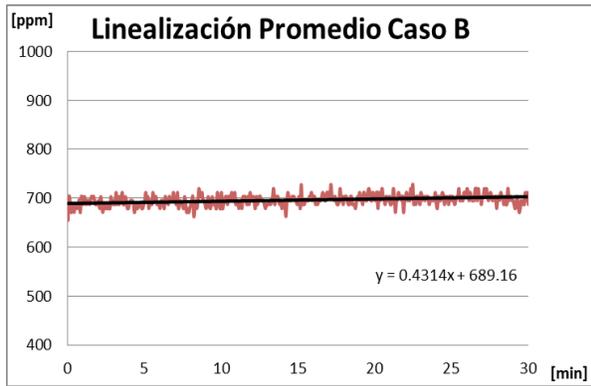
En dichas gráficas, al igual que en las gráficas de variación (linealización) la disminución del valor de error se aprecia de manera más clara en el caso de la Prueba 2, donde se produjo una reducción del error, pasando de 329ppm a 297ppm, mientras que la reducción para la Prueba 1 y el Promedio, fue de 362 a 329ppm y de 345.5 a 313ppm.



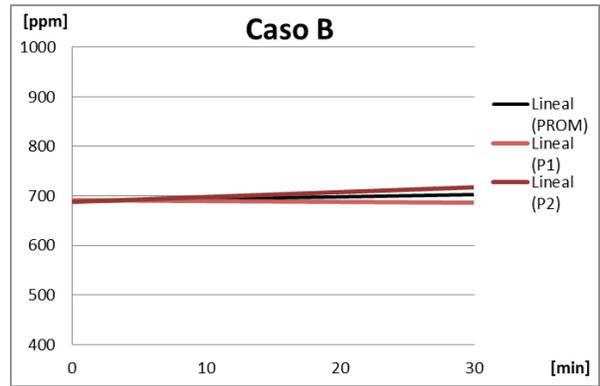
a)



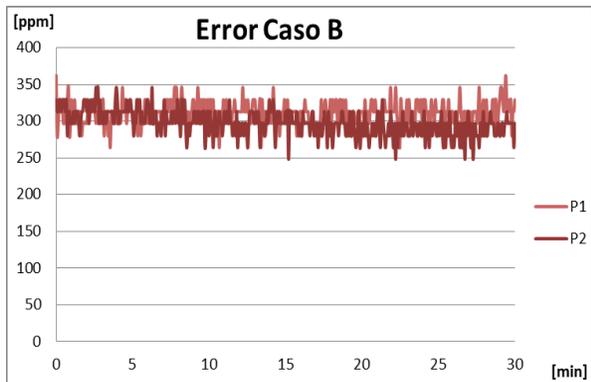
b)



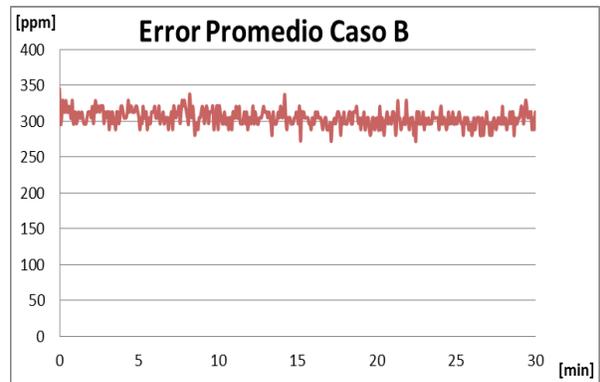
c)



d)



e)



f)

Figura 4.28 – Análisis de cambios de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso B

## CASO C

En el Caso C se buscó observar el comportamiento del sistema con respecto a la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina cuando en ésta no se encontrara ningún pasajero presente pero, a diferencia del Caso A, se sustituyeron las ventanas del vehículo por las que incluyen los ventiladores que se activarán si se sobrepasa el valor límite establecido (1000 ppm).

### Prueba 1:

Los valores iniciales de esta prueba fueron, en el exterior, de 62.7% de humedad relativa, 19.2°C de temperatura y concentración de 449ppm, y en el interior, de **671ppm** de concentración de CO<sub>2</sub>.

Al término de la prueba, se registraron valores exteriores de 66% de humedad relativa, 18.5°C de temperatura y 460ppm de concentración de CO<sub>2</sub>, mientras que al interior de la cabina se registró una concentración de **654ppm**.

### Prueba 2:

En esta prueba, con valores exteriores de 69.5% de humedad relativa, 17.9°C de temperatura y concentración de 470ppm, se registró un valor de **622ppm** de concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina.

Con valores exteriores de 69.1% de humedad relativa, 17.6°C de temperatura y 456ppm de concentración de CO<sub>2</sub>, al final de la prueba, se registró una concentración de **654ppm** en el interior de la cabina.

La Tabla 4.15 muestra los resultados obtenidos durante ambas pruebas correspondientes al Protocolo C. Asimismo, dichos resultados se ilustran en las gráficas de la Figura 4.29.

CASO C		
Tiempo [min]	Prueba 1 [ppm]	Prueba 2 [ppm]
0	671	622
3	671	606
6	687	589
9	654	573
12	638	638
15	671	573
18	671	573
21	622	589
24	638	622
27	687	573
30	654	654

Tabla 4.15 –Variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso C

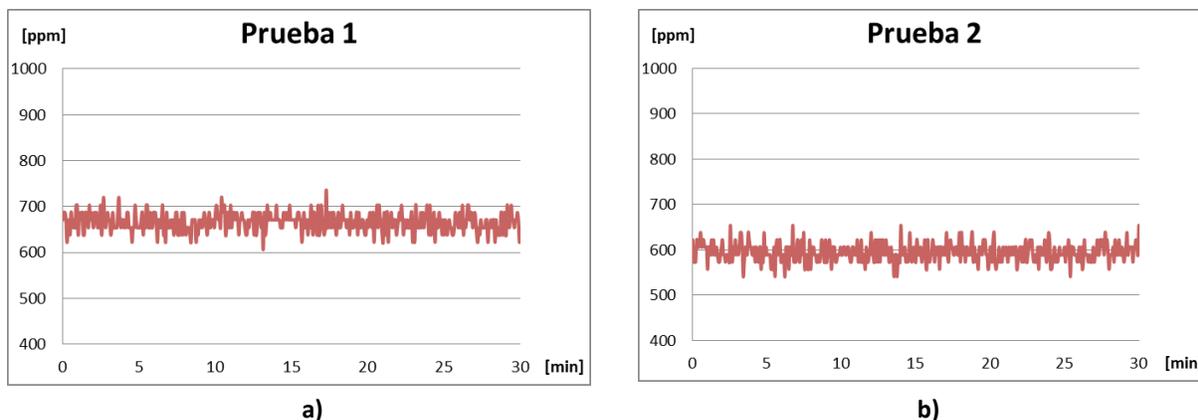
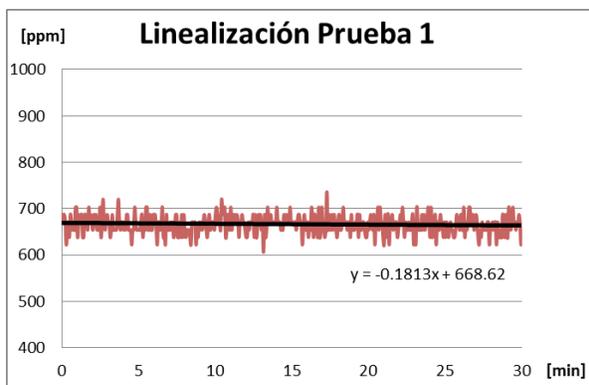


Figura 4.29 – Variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso C

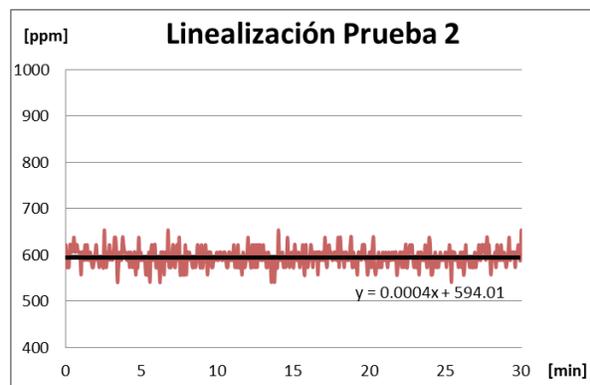
Las gráficas correspondientes a la obtención del ajuste lineal de las curvas de variación de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina durante las pruebas realizadas siguiendo el procedimiento del Caso C, así como de la curva del promedio de ambas pruebas se ilustran en los incisos a), b) y c) de la Figura 4.30, mientras que el resumen de las tres gráficas se muestra en la Figura 4.30d).

Como se puede apreciar en estas gráficas, en el Caso C, a pesar del desfase en el intervalo de valores que se registró entre ambas pruebas, sus comportamientos fueron muy similares, ya que no se puede apreciar un incremento en el valor de la concentración de CO<sub>2</sub> dentro de la cabina. Lo mismo se observa en el ajuste lineal del promedio de ambas pruebas.

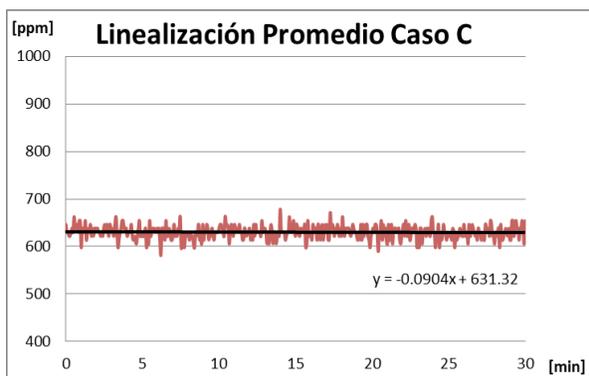
Como se puede apreciar en las gráficas correspondientes al error (Figuras 4.30e y 4.30f), en el Caso C, no se presentó un incremento en la concentración de CO<sub>2</sub>, pues el valor del error se mantuvo en el mismo rango durante las pruebas, siendo sus valores iniciales de 329, 378 y 353.5 para la Pruebas 1, Prueba 2 y Promedio respectivamente, mientras que las tres pruebas presentaron un valor de error final de 346 ppm.



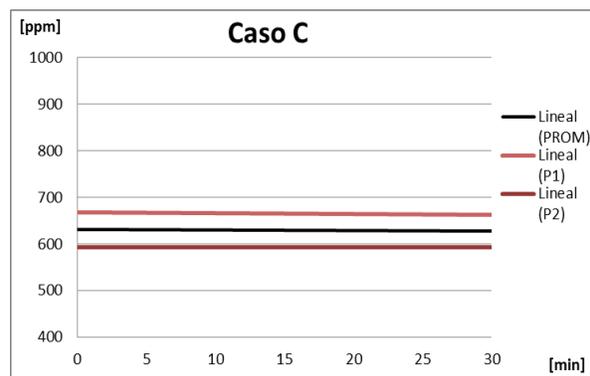
a)



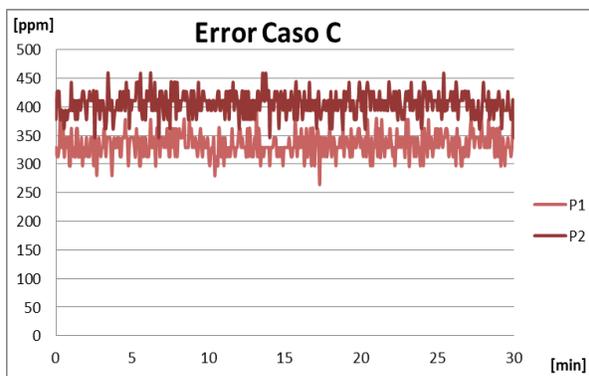
b)



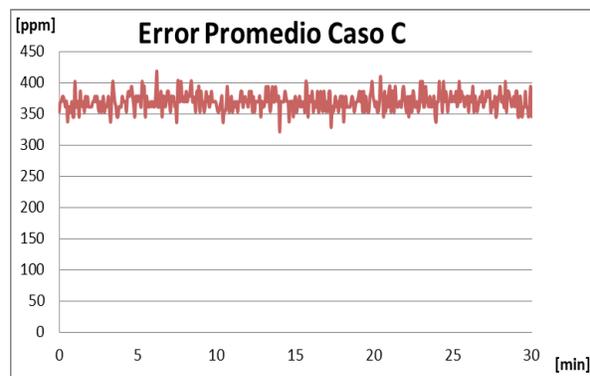
c)



d)



e)



f)

Figura 4.30 – Análisis de cambios de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso C

## CASO D

En el Caso D se buscó observar el comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina cuando en ésta se encuentra un pasajero presente. Asimismo, al igual que en el Caso C, se sustituyeron las ventanas del vehículo por las que incluyen los ventiladores que se activarán si se sobrepasa el valor límite establecido (1000 ppm).

### Prueba 1:

Al inicio de esta prueba se registraron valores de 66.2% de humedad relativa, 18.6°C de temperatura y concentración de 455ppm en el exterior de la cabina, y una concentración de **654ppm** en el interior.

Al término de la prueba, se registraron valores exteriores de 69.1% de humedad relativa, 18.1°C de temperatura y 468ppm de concentración de CO<sub>2</sub>, mientras que al interior de la cabina se registró una concentración de **687ppm**.

### Prueba 2:

Los valores exteriores al inicio de la prueba fueron de 67.6% de humedad relativa, 17.7°C de temperatura y concentración de 455ppm. Asimismo, se registró un valor de **573ppm** de concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina.

Los valores exteriores al final de la prueba fueron de 67.8% de humedad relativa, 17.6°C de temperatura y 454ppm de concentración de CO<sub>2</sub>, mientras que al interior de la cabina se registró una concentración de **638ppm**.

La Tabla 4.16 presenta la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> registrados durante las Pruebas 1 y 2 del Caso D. Asimismo, las gráficas correspondientes a dichas pruebas se muestran en la Figura 4.31.

CASO D		
Tiempo [min]	Prueba 1 [ppm]	Prueba 2 [ppm]
0	654	573
3	671	638
6	687	622
9	671	573
12	654	606
15	654	622
18	720	638
21	720	638
24	638	638
27	671	638
30	687	638

Tabla 4.16 –Variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso D

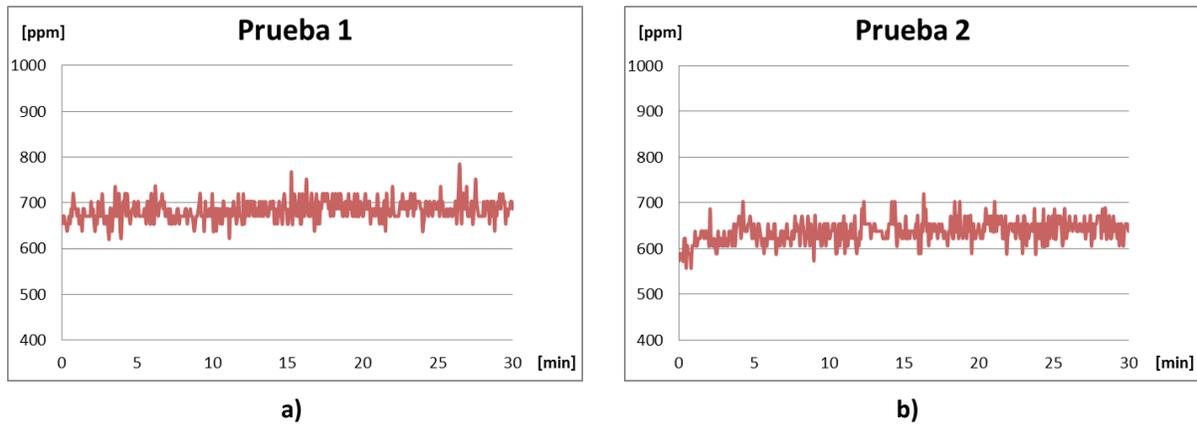
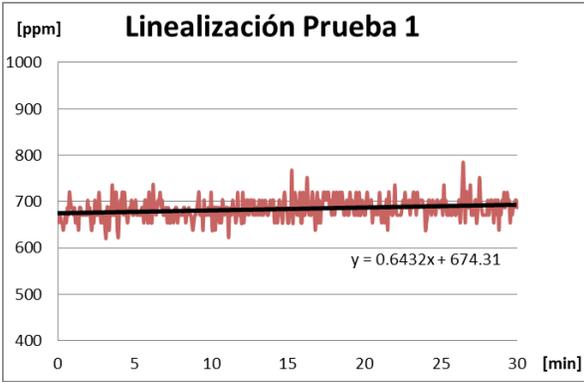


Figura 4.31 – Variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso D

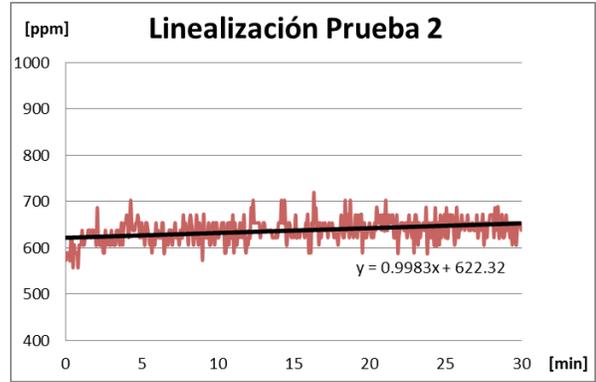
Las Figuras 4.32a y 4.32b muestran las gráficas correspondientes a la linealización de las curvas de variación de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cabina durante las pruebas realizadas siguiendo el procedimiento del Caso D, mientras que la linealización la curva del promedio de ambas pruebas, así como el resumen de las tres gráficas linealizadas se muestran en las Figuras 4.32c y 4.32d, respectivamente.

En el caso de estas curvas, al igual que en las pruebas realizadas en el Caso C, se observa un desfase en el intervalo de valores registrados durante las Pruebas 1 y 2. Sin embargo, ambas pruebas se observa un comportamiento muy similar, en donde se puede apreciar claramente el incremento que hubo en la concentración de dióxido de carbono en el interior de la cabina durante el tiempo de duración de las pruebas. Asimismo, se puede observar la tendencia al incremento de la concentración en la gráfica correspondiente al promedio de ambas pruebas.

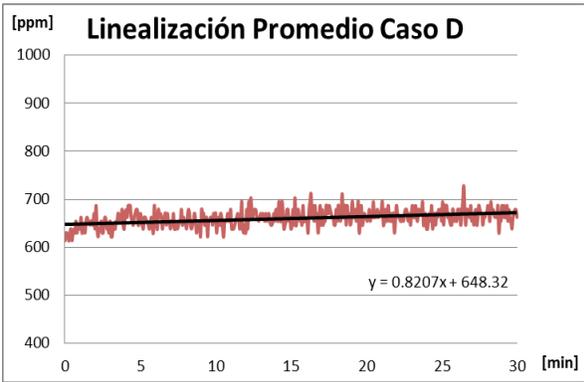
De igual manera, el comportamiento del valor de error obtenido en las Pruebas 1 y 2, así como del promedio de ambas pruebas, que se ilustran en las Figuras 4.32e y 4.32f, muestra el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub>, a través de la variación del valor inicial con respecto al valor objetivo, ya que se produjo una reducción en los valores de error, pasando de 346 a 313ppm en la Prueba 1, de 427 a 362 ppm en la Prueba 2 y de 386.5 a 337.5ppm en el caso del Promedio.



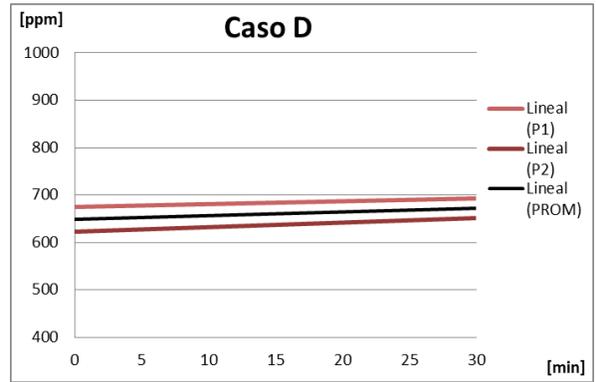
a)



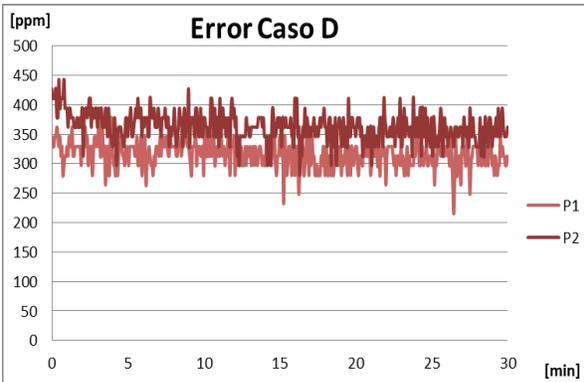
b)



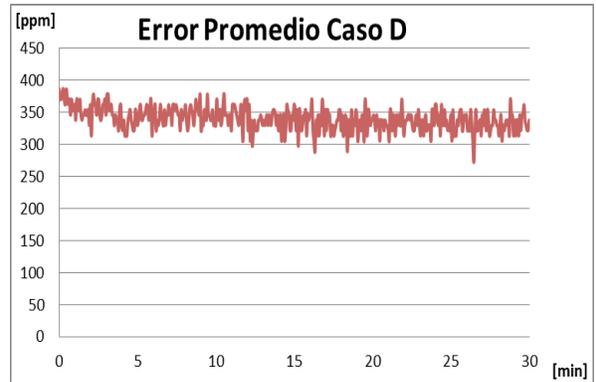
c)



d)



e)



f)

Figura 4.32 – Análisis de cambios de concentración de CO<sub>2</sub> en las pruebas del Caso D

## Cumplimiento de los requerimientos

Como se mencionó al inicio del capítulo, además de evaluar directamente los elementos del concepto seleccionados que fueron empleados en la creación modelo funcional con respecto a su capacidad de modificar o no las variables, las pruebas realizadas tenían como propósito observar la interacción de los subsistemas que integran el sistema propuesto, con el fin de verificar si el concepto elegido satisface los requerimientos establecidos en la fase de diseño conceptual.

Con base en lo observado durante las pruebas realizadas, se generó la Tabla 4.17, que presenta una evaluación de los subsistemas probados con respecto al cumplimiento de los requerimientos.

REQUERIMIENTO	CRITERIO	SUBSISTEMA(S) RELACIONADO(S)	¿CUMPLE?		OBSERVACIONES
			Sí	No	
<b>Lectura de variables</b>	Es capaz de obtener valores de temperatura, humedad relativa y concentración de CO <sub>2</sub> dentro de la cabina.	S. de sentido de variables S. de procesamiento	X		El sistema es capaz de obtener los datos correspondientes a las tres variables, de manera simultánea.
<b>Visualización y almacenado</b>	Presenta los valores leídos en una interfaz gráfica y almacena la información obtenida en la prueba.	S. de monitoreo y controles	X		La interfaz gráfica presenta de manera simultánea los valores leídos y genera un archivo de registro al finalizar las pruebas.
<b>Confiabilidad</b>	Los datos leídos representan de manera real las condiciones en la cabina.	S. de sentido de variables S. de procesamiento	*		A excepción de la concentración de CO <sub>2</sub> , los valores obtenidos representan de manera precisa las condiciones de la cabina.
<b>Facilidad de manejo</b>	La interfaz presenta la información de manera clara, ordenada y directa.	S. de monitoreo y controles	X		La interfaz presenta la información de manera clara. Asimismo, la modificación de los valores límite es fácil y directa.
<b>Modificación de variables</b>	Es capaz de realizar modificaciones en las condiciones de la cabina.	S. de procesamiento S. de modificación de variables	*		Se presentan modificaciones pero no se alcanzan los valores establecidos.
<b>Intervención de usuarios</b>	El sistema debe ser capaz de monitorear las variables y activar actuadores sin intervención manual de los usuarios.	S. de procesamiento S. de suministro de energía	X		Con excepción de la activación del sistema al inicio de las pruebas, y el ingreso de los valores límite, todo el proceso se lleva a cabo sin intervención manual
<b>Velocidad de funcionamiento</b>	La respuesta de los sensores y los actuadores debe ser rápida.	S. de sentido de variables S. de procesamiento S. de modificación de variables	X		La respuesta de los sensores y los actuadores se da en el tiempo establecido para cada lectura (4s).
<b>Seguridad</b>	No representa ningún tipo de riesgo para la salud del usuario.	Todos los sistemas	X		Los únicos posibles riesgos se evitan al explicar y seguir adecuadamente los protocolos.
<b>Discreción</b>	Su presencia no interfiere (de manera visual o auditiva) con las pruebas, a modo de distractor.	S. de modificación de variables S. de suministro de energía		X	Debido a las limitaciones de espacio y elementos empleados, todos los elementos se encontraban a la vista.

Tabla 4.17 – Comparativa de los requerimientos del sistema con el cumplimiento de cada subsistema

Nota: los requerimientos marcados con \* en lugar de X representan aquellos que no fueron completamente satisfechos, pero que no pueden ser considerados del todo desatendidos.

# CAPÍTULO 5

## CAPÍTULO 5- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El interior de la cabina de un automóvil es un espacio que se encuentra sometido frecuentemente a perturbaciones simultáneas que se reflejan en las condiciones climáticas en las cuales se encuentran inmersos los pasajeros del vehículo, alcanzando valores inconvenientes que causan sensación de incomodidad. Esta sensación contribuye al incremento de estados de estrés, fatiga u otros padecimientos, considerados inconvenientes para la conducción, ya que afectan directamente al desempeño del conductor. Es por ello que se ha impulsado la investigación en vistas del desarrollo y optimización de sistemas que busquen garantizar la comodidad, y por lo tanto la seguridad, de los pasajeros.

Con base en el problema planteado anteriormente, se planteó como objetivo la propuesta de un sistema para el monitoreo y compensación de las tres variables ambientales que se identificaron como las principales causantes de falta de confort o comodidad dentro de la cabina de un automóvil. El desarrollo de dicha propuesta se llevó a cabo siguiendo una metodología de diseño, que permitió partir de la definición de la necesidad, logrando la generación de conceptos que proporcionaron distintas soluciones enfocadas a los requerimientos del producto, llegando finalmente a la fabricación y prueba de un modelo funcional.

El empleo de este tipo de metodología ayudó a generar etapas de desarrollo del proyecto bien definidas, de manera que se pudieron identificar aquellas donde se encuentran las debilidades que se deben atender para obtener mejores resultados, sin tener que reiniciar o alterar totalidad del proceso de diseño.

A manera general y tomando en cuenta los alcances determinados para esta primera etapa de diseño del producto propuesto, el sistema desarrollado en este proyecto cumplió con el objetivo planteado, ya que se logró generar y probar un modelo funcional capaz de monitorear, a través de la interfaz gráfica que se generó, las tres variables seleccionadas, así como realizar modificaciones en las mismas. Sin embargo, como se observó en la tabla comparativa resultante de las pruebas, mostrada en el Capítulo 5, algunos subsistemas no lograron cumplir con sus objetivos particulares conforme a lo esperado.

Los resultados en los que se basan estas conclusiones fueron obtenidos a través de las pruebas a las que se sometió el modelo funcional generado, donde la finalidad fue observar el comportamiento de cada uno de los subsistemas, así como la interacción entre ellos.

En el caso del *Sistema de sensado de variables*, se confirmó que tanto los sensores RHT03 como la librería empleada en la programación para la adquisición de datos funcionaron de manera adecuada, pues su respuesta fue rápida, confiable y sobretodo precisa, al registrar variaciones desde 0.05°C temperatura y 0.05% de humedad relativa. Sin embargo, con respecto a la concentración de dióxido de carbono, los resultados obtenidos no fueron alentadores en cuanto a la validación del uso del sensor MG811.

Si bien los resultados permitieron observar la variación que existe en la concentración de CO<sub>2</sub> dentro de la cabina, a través de la comparación de los casos en que ésta se encuentra desocupada y cuando hay un pasajero dentro, el sensor presenta constantes variaciones en los voltajes leídos, especialmente en el caso del voltaje inicial, de manera que los valores de concentración obtenidos a partir de la función generada a través de la calibración no contaron con la confiabilidad deseada.

De estos resultados se observó que el tiempo mínimo requerido para el calentamiento del sensor, es decir, el tiempo a partir del cual se obtiene una respuesta estable es de dos horas y media. Asimismo, no se descarta por completo el uso de éste sensor, ya que sí demostró responder ante las variaciones de concentración, sin embargo se recomienda un trabajo más enfocado en una apropiada calibración, como parte del trabajo futuro, en función de la mejora del sistema.

Con respecto al *Sistema de suministro de energía*, los resultados obtenidos en las pruebas confirmaron la capacidad de las fuentes seleccionadas, ya que todos los elementos fueron alimentados correctamente. Asimismo, los circuitos de potencia generados para el sistema funcionaron de la manera esperada, por lo que se validó el diseño empleado en las placas impresas, especialmente el circuito correspondiente al controlador de las celdas de Peltier (Puentes H), donde se logró invertir la polaridad de manera inmediata y sin problemas, además de que se comprobó que el uso de los MOSFET de potencia no representaron pérdidas significativas en el voltaje.

En el caso del *Sistema de procesamiento*, se validó el uso de la tarjeta Arduino UNO como unidad de procesamiento, ya que proporcionó los puertos necesarios para la recepción de datos, así como la activación de los elementos de los sistemas de suministro de energía y modificaciones. De igual manera se comprobó que el uso del ambiente de desarrollo integrado (IDE) empleado para la tarjeta Arduino permitió la generación de un programa lo suficientemente robusto para llevar a cabo los proceso de adquisición, manipulación y generación de datos requeridos, además de que se logró una correcta comunicación con la interfaz gráfica a través de la comunicación serial.

Para los fines de esta etapa de diseño del sistema propuesto se trabajó con un controlador del tipo ON-OFF para la activación de los elementos de actuación, considerando por separado las condiciones requeridas para la modificación de cada una de las variables. Si bien este tipo de controlador funcionó de manera esperada, suficiente para las pruebas realizadas, los resultados obtenidos permitieron observar que existe una relación entre la manera en que las variables y sus actuadores se afectan entre sí, por lo que una sugerencia de modificación a futuro en busca de una mejor respuesta del sistema sería la generación de un controlador más complejo, que se enfoque en la reducción del error considerando el tiempo de variación, así como la magnitud del error. Con base en los resultados analizados, se observa que la velocidad de variación dentro del sistema no es constante, y en algunos casos se presenta más rápido que en otros, por lo que se buscaría generar un controlador de tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

El *Sistema de monitoreo y controles*, cuyo elemento fundamental de acción es la interfaz gráfica, desempeñó sus funciones de manera correcta y en función de lo esperado. La distribución de los elementos en el panel de control de la interfaz generada permitió el monitoreo simultáneo de las tres variables de manera ordenada y clara. Lo mismo sucedió con la sección de los controles, designada al ingreso de los valores objetivo para cada prueba. Dichos resultados lograron validar el uso de la plataforma de National Instruments, LabVIEW, como herramienta de interacción con el sistema, pues además de proporcionar una representación gráfica agradable y clara, así como una comunicación directa con el microcontrolador a través del puerto serial, permitió incorporar algunas funciones de programación requeridas para el procesamiento de los datos, de manera sencilla y sin interferir con la programación del microcontrolador.

Las pruebas realizadas se enfocaron de manera directa a la observación del comportamiento del *Sistema de modificación de variables*, para obtener información referente a la capacidad de los elementos seleccionados para la construcción del modelo funcional, con el fin de validar su uso. Con respecto a los elementos empleados para la modificación de la variable temperatura, se buscaba un comportamiento tal que permitiera generar incrementos o disminuciones de la misma, dependiendo del valor inicial con respecto al valor objetivo. Si bien, como se observó en los resultados, el sistema tuvo la capacidad de generar dichos cambios, los incrementos y disminuciones que se lograron en el tiempo de las pruebas tuvieron valores reducidos con respecto a lo que se esperaba, siendo el incremento mayor de 2.5°C, y la máxima disminución de 1.35°C, en el tiempo total de 30 minutos.

Considerando los resultados obtenidos por Raut [46], donde el factor principal que afectó al comportamiento del sistema de enfriamiento fueron las condiciones ambientales exteriores y tomando en cuenta que en el caso de las pruebas realizadas para este proyecto se disminuyó dicho efecto al mantener al vehículo bajo techo, lo cual se observó comparando los valores de temperatura y humedad en el exterior registrados al inicio y final de las pruebas con las condiciones en el interior, se puede asumir que la deficiencia del sistema para alcanzar los cambios deseados se debió a las limitaciones dadas por los elementos empleados, así como la instalación del módulo dentro del vehículo, de manera que, se validó la funcionalidad de las celdas termoeléctricas como elemento tanto para el enfriamiento como para el calentamiento del aire en el interior de la cabina. Sin embargo, se requiere de mucho trabajo a futuro, enfocado en el diseño detallado y la selección o manufactura de los elementos de construcción de este módulo, en especial los disipadores y conductos o vías de distribución del aire, para generar mejores respuestas de parte del sistema.

Algo similar sucedió con la modificación de la humedad relativa, donde se comprobó el uso de un humidificador ultrasónico de vapor frío para el incremento de la humedad en el interior de la cabina, ya que se obtuvieron incrementos de hasta 5.5% de humedad en 30 minutos de prueba, sin embargo, no se alcanzó el valor objetivo en ninguna de las pruebas. Dichos incrementos se vieron afectados también por el valor inicial de la humedad relativa, ya que en los casos en donde el valor inicial era bajo, se lograron variaciones mucho menores que en los casos en los que el valor inicial se encontraba más cerca del objetivo, por lo que se concluyó que las capacidades del humidificador empleado en el modelo funcional probado no son suficientes para lograr el comportamiento deseado.

Asimismo, se observó una diferencia considerable en el comportamiento del sistema con respecto a la humedad relativa entre las pruebas donde había un usuario en el interior de la cabina y aquellas donde se encontraba vacía, siendo mayores los valores de incremento en el primer caso, lo cual resultó conforme a lo esperado.

En el caso de la modificación de la variable concentración de dióxido de carbono, se comprobó que la instalación de los ventiladores genera un rápido cambio en las condiciones interiores de la cabina, al ser una de las principales causas de interferencia en las pruebas de temperatura y humedad, cuando los ventiladores se activaron por fallas en la lectura del sensor de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, no se pudo comprobar exactamente el efecto que tuvo este sistema en la modificación de la concentración de dióxido de carbono debido a que en las pruebas enfocadas a esta variable nunca se alcanzó el valor límite que generaba la activación de dichos ventiladores. El trabajo futuro respecto a esta sección del sistema va ligado al trabajo que se realice sobre el comportamiento del sensor, mencionado anteriormente.

Cabe recordar que la hipótesis del presente proyecto plantea el desarrollo mostrado en este escrito como la primera iteración del diseño de un producto final, con el fin de sentar precedentes para su desarrollo futuro, por lo que los resultados obtenidos otorgan validez a dicha hipótesis.

# REFERENCIAS

[1] Número de habitantes.

Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>

Fecha de consulta: 14 de Noviembre de 2013

[2] Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2012, INEGI.

Disponible en:

[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/aeem/2012/aeem2012.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/aeem/2012/aeem2012.pdf)

Fecha de consulta: 14 de Noviembre de 2013

[3] Informe de la situación del medio ambiente en México. Capítulo 1- Población y medio ambiente

Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/01\\_poblacion/cap1\\_1.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/01_poblacion/cap1_1.html)

Fecha de consulta: 14 de Noviembre de 2013

[4] Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas

Disponible en: [http://www.inegi.org.mx/est/lista\\_cubos/consulta.aspx?p=adm&c=1](http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=adm&c=1)

Fecha de consulta: 14 de Noviembre de 2013

[5] Accidentes y sus factores. Comisión Nacional de Seguridad (CNS).

Disponible en:

[http://ssp.gob.mx/portalWebApp/appmanager/portal/desk?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=portals\\_portal\\_page\\_m2p1p2&content\\_id=830068&folderNode=830052&folderNode1=810277](http://ssp.gob.mx/portalWebApp/appmanager/portal/desk?_nfpb=true&_pageLabel=portals_portal_page_m2p1p2&content_id=830068&folderNode=830052&folderNode1=810277)

Fecha de consulta: 2 de Diciembre de 2013

[6] Tarifa E. E., “Teoría de modelos y simulación”, Universidad de Jujuy.

Disponible en:

[http://samvisual.com.mx/cecyteg/soporte/media/media\\_archivos/13857465435298d06fe1a35.pdf](http://samvisual.com.mx/cecyteg/soporte/media/media_archivos/13857465435298d06fe1a35.pdf)

Fecha de consulta: 28 de Abril de 2014.

[7] Weir D. H., Application of a driving simulator to the development of in-vehicle human-machine interfaces, IATSS Research, Volume 34, Issue 1, 2010, pp. 16–21.

[8] “Comienzan cursos de conducción con simulador de inmersión de última tecnología”, Abril de 2013, a través de Portal Minero.

Disponible en: <http://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=75863873>

Fecha de consulta: 28 de Abril de 2014.

[9] Green P. et al, “Audi-visual system design recommendations from experience with the UMTRI driving simulator”, DSC North America 2003 Proceedings, Octubre de 2003.

[10] Nilsson, L. “Behavioral research in an advanced driving simulator – Experiences of the VTI system”, Proceedings of the Humans Factors and Ergonomics Society 37<sup>th</sup> Annual Meeting, Seattle EE.UU., 1999.

[11] Blana, E. “A survey of driving research simulators around the world”, Institute of transport studies, University of Leeds, Working Paper 481, 1996.

- [12] Kemeny A., Panerai F., "Evaluating perception in driving Simulation experiments", *TRENDS in Cognitive Sciences*, Vol. 7, Núm. 1, 2003, pp. 31-37.
- [13] Casas J., Nguen T. T., "An integrated framework combining a traffic simulator and a driving simulator", *Procedia Social and Behavioural Sciences*, 20, 2011, pp. 648-655.
- [14] De Rosario H., Solaz J. S., et al., "Controlled inducement and measurement of drowsiness in a driving simulator", *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 4, 2010, pp. 280-288.
- [15] Dionisio J., et al., "The virtual touch: haptic interfaces in virtual environments", *Computers & Graphics*, Volume 21, Issue 4, 1997, pp. 459-468.
- [16] Usoh M., Slater M., An exploration of immersive virtual Environments, *Endeavour*, Volume 19, Issue 1, 1995, pp. 34 – 38.
- [17] Bowman D. A., McMahan R. P., *Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough?* Computer, Volume: 40, Issue: 7, 2007, pp. 36 – 43.
- [18] Romero J. A., Martínez E., Valencia M., Martínez M., "Generalidades sobre el entrenamiento de conductores y el desarrollo de simuladores de manejo", *Publicación técnica No. 240*, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y transportes, Querétaro, México, 2004.
- [19] Clark J., "Mercedes-Benz Driving Simulator", *Noviembre de 2012*.  
Disponible en: <http://www.emercedesbenz.com/autos/mercedes-benz/corporate-news/mercedes-benz-driving-simulator/>  
Fecha de consulta: 30 de Abril de 2014.
- [20] Omar M. A., et al., *Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review*, *Applied Thermal Engineering* 31, 2011, pp.995-1002.
- [21] Mezrhab A., Bouzidi M., "Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment", *Applied Thermal Engineering* 26, 2006, pp. 1697-1704.
- [22] Daanen A. M. H et al, "Driving performance in cold, warm, and thermoneutral environments", *Applied Ergonomics* Vol. 6, 2003, pp. 597-602.
- [23] Tootoonchi A. A., Farzaneh Y., *Controlling automobile thermal comfort using optimized fuzzy controller*, *Applied Thermal Engineering*, 28, 2008, pp. 1906-1917.
- [24] Wang S. K., "Handbook of air conditioning and refrigeration", 2a Edición, Mc Graw- Hill, EE.UU., 2001, pp 1401.
- [25] Orioli A., et al, "Air quality and relative humidity in commercial aircrafts: An experimental investigation on short-haul domestic flights", *Building and Environment* 67, 2013, pp. 69-81.
- [26] Alonso Pelaez, David, "Factores que influyen en la confortabilidad", *Técnicas del automóvil, sistemas de climatización*, Thomson Paraninfo, España, 2004, pág. 11.

- [27] "The concept of effective temperature", HVAC Air Conditioning Designs.  
Disponible en: <http://www.hvacairconditioningdesign.com/conceptf-effective-temperature/>  
Fecha de consulta: 18 de Diciembre de 2013
- [28] Möller L., Sörensen L., "Thermodynamical Mordeling of a car cabin", Tesis (Master in Science), Suecia, Chalmers University of Technology, Department of Signals and Systems, 2011, pp. 64.
- [29] "Basic theory and principles of operation of A/C", MISTERmatic, 2005.  
Disponible en: <http://www.jaguar-swansea.co.uk/aircon/theory.htm>  
Fecha de consulta: 20 de Diciembre de 2013.
- [30] Valdez Romero, Eduardo. Desarrollo de un Control de Temperatura para una Incubadora Usada en Ingeniería Ambiental. Tesis (Ingeniería Eléctrico Electrónico). México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2012. 107 p.
- [31] "What is relative humidity and how does it affect how I feel outside?", Meteorological terms.  
Disponible en: <http://science.howstuffworks.com/dictionary/meteorological-terms/question651.htm>  
Fecha de consulta: 20 de Diciembre de 2013.
- [32] "Calidad del aire", PROAIRE Jalisco, 2011- 2010, a través de Colectivo Ecologista de Jalisco.  
Disponible en: <http://airedecalidad.org/calidad-del-aire>  
Fecha de consulta: 20 de Diciembre de 2013.
- [33] Galatsis K., Wlodarski W., Car Cabin Air Quality Sensors and Systems, Encyclopedia of Sensors, Volume X, 2006, pp. 1–11.  
Disponible en: [http://www.co-gas-expert.com/wp-content/uploads/2012/12/Encyclopedia\\_Chapter.pdf](http://www.co-gas-expert.com/wp-content/uploads/2012/12/Encyclopedia_Chapter.pdf)  
Fecha de consulta: 18 de septiembre de 2013.
- [34] Sato S., "Air Quality in Auto Cabin", R&D Review of Toyota CRDL, Vol. 39, No.1, 2004.  
Disponible en: [http://www.tytlabs.com/english/review/rev391epdf/e391\\_036sato.pdf](http://www.tytlabs.com/english/review/rev391epdf/e391_036sato.pdf)  
Fecha de consulta: 18 de Septiembre de 2013.
- [34] Halgamuge M. N., et al, "Ventilation efficiency and Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration", PIERS Online, Vol. 5, No. 7, 2009, pp. 637-640.
- [35] Park, S., Kim, K., Kwon, H., "Experimental Study on the Air Quality of Vehicle's Cabin by Evaluating CO<sub>2</sub> Concentration and Fine Dust on the Actual Road," SAE Technical Paper 2009-01-0536, 2009.  
Disponible en: <http://papers.sae.org/2009-01-0536/>  
Fecha de consulta: 22 de Enero de 2015
- [36] Scott J. L., et al, "Occupational hazards of carbon dioxide exposure", Journal of Chemical Health and Safety, Vol 16, 2009, pp. 18-22.
- [37] Mallinger S., "Potential Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Asphyxiation Hazard When Filling Stationary Low Pressure CO(2) Supply Systems", OSHA Hazard Information Bulletins, 1996.  
Disponible en: [http://www.osha.gov/dts/hib/hib\\_data/hib19960605.html](http://www.osha.gov/dts/hib/hib_data/hib19960605.html)  
Fecha de consulta: 22 de Enero de 2015

[38] Chow W. K., "Ventilation of enclosed train compartments in Hong Kong", *Applied Energy* 71, 2002, pp. 161-170.

[39] "Carbon Dioxide Comfort Levels", The Engineering Toolbox.  
Disponible en: [http://www.engineeringtoolbox.com/co2-comfort-level-d\\_1024.html](http://www.engineeringtoolbox.com/co2-comfort-level-d_1024.html)  
Fecha de consulta: 22 de Enero de 2015

[40] Dougan D. S., Damiano L., "CO<sub>2</sub>-Based demand control ventilation", *ASHRAE Journal*, Octubre 2004, pp. 47-53.

[41] Redacción Informador, "Contará Vialidad con simulador de manejo en área de Licencias", *Informador* [en línea], 24 de diciembre 2013.  
Disponible en: <http://www.informador.com.mx/jalisco/2008/65316/6/contara-vialidad-con-simulador-de-manejo-en-area-de-licencias.htm>  
Fecha de consulta: 15 de enero de 2014

[42] Redacción Jornada Jalisco, "Movilidad refuerza la sensibilización en jóvenes para evitar que conduzcan ebrios", *La Jornada Jalisco* [en línea], 3 de octubre 2013.  
Disponible en: <http://www.lajornadajalisco.com.mx/2013/10/03/movilidad-refuerza-la-sensibilizacion-en-jovenes-para-evitar-que-conduzcan-ebrios/>  
Fecha de consulta: 15 de enero de 2014.

[43] Tartakovsky L., Baibikov V., Czerwinski J., Gutman M., Kasper M., Popescu D., Veinblat M., Zvirin Y., In-vehicle particle air pollution and its mitigation, *Atmospheric Environment*, 64, 2013, pp. 320 – 328.

[44] González Mendoza, A. D., Ibarra Cordero F., Santana Bautista L. R. Control Automático de Temperatura Interna de un Automóvil con Lógica Difusa. Tesis (Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica). México, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Adolfo López Mateos, 2009, 113 p.

[45] Khayaam H., Nahavandi S., Hu E., Kouzani A., Chonka A., Abawajy J., Marano V., Davis S., Intelligent energy management control of vehicle air conditioning via look-ahead system, *Applied Thermal Engineering*, 31, 2011, pp. 3147 – 3160.

[46] Raut M. S. et al., "Thermoelectric Air Cooling for Cars", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 4 No. 5, 2012, pp. 2381-2394

[47] Protasiewytch, Eloir Fernando, "Automotive air conditioning device with thermoelectric elements and PMW control circuit", WO1999010191 A1, App. PCT/BR1998/000061, Marzo 4 1998.

[48] Martínez Mendoza, M., Rivera Hernández, A. Control y Monitoreo de Temperatura, Humedad Relativa, Luminosidad y Riego en el Invernadero para Mantener la Supervivencia de la bacteria *Huanglobing*. Tesis (Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica). México, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, 2012. 131 p.

[49] Valdez Romero, Eduardo. Desarrollo de un Control de Temperatura para una Incubadora Usada en Ingeniería Ambiental. Tesis (Ingeniería Eléctrico Electrónico). México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2012. 107 p.

[50] Garnica Albor, J., Martínez López, V. A. Diseño y Control de Temperatura-Humedad en una Incubadora de Huevos. Tesis (Ingeniería Eléctrico Electrónico). México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2011. 98 p.

[51] Pérez González C. U., González Ríos A., Alejandro Santana Orozco, A. Control y Monitoreo de Temperatura Vía Internet. Tesis (Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica). México, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Adolfo López Mateos, 2008. 95p.

[52] Shigley J. E., Mitchell L. D., "Diseño en Ingeniería Mecánica", 4ª edición, Mc Graw- Hill, México, 1993.

[53] Ulrich, K. T., Eppinger S. D., "Diseño y desarrollo de productos", 4ª edición, Mc Graw- Hill, México, 2009.

[54] Berglund B., Lindvall T., Schwela D. H., "Guidelines for community noise", Organización Mundial de la Salud, 1999.

Disponible en: <http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>

Fecha de consulta: 30 de Enero de 2015

[55] MaxDetect RHT03 datasheet

Disponible en: <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Weather/RHT03.pdf>

Fecha de consulta: 25 de Septiembre de 2013

[56] Sandbox Sen-000007 datasheet

Disponible en: [http://netdrive.envell.com/pic/ebay/SEN-000007/SEN-000007\\_Datasheet.pdf](http://netdrive.envell.com/pic/ebay/SEN-000007/SEN-000007_Datasheet.pdf)

Fecha de consulta: 10 de Octubre de 2013

[57] Hanwei Electronics, MG811 datasheet

Disponible en: [www.olimex.cl/pdf/CO2b.pdf](http://www.olimex.cl/pdf/CO2b.pdf)

Fecha de consulta: 30 de Septiembre de 2013

[58] MP2359 Step-down converter datasheet

Disponible en: <http://www.monolithicpower.com/DesktopModules/DocumentManage/API/Document/>

Fecha de consulta: 11 de Febrero de 2015

[59] Arduino UNO datasheet

Disponible en: <http://datasheet.octopart.com/A000066-Arduino-datasheet-38879526.pdf>

Fecha de consulta: 15 de Febrero de 2015

[60] Wheat D., "Arduino Internals", Apress, New York, EE. UU., 2011, 372 págs.

[61] HB TEC1-12706 Thermoelectric Cooler datasheet

Disponible en: [http://www.sos.sk/a\\_info/resource/i/TEC1-12706.pdf](http://www.sos.sk/a_info/resource/i/TEC1-12706.pdf)

Fecha de consulta: 28 de Enero de 2014

[62] Ventilador VN4-012P

Disponible en: [http://www.steren.com.mx/catalogo/prod.asp?p=3756&s=vn4-012p&search\\_type=prod](http://www.steren.com.mx/catalogo/prod.asp?p=3756&s=vn4-012p&search_type=prod)

Fecha de consulta: 1 de Abril de 2015

- [63] Tellurex Corp., “An introduction to thermoelectrics”, 2010.  
Disponible en: <http://fraden.brandeis.edu/courses/phys39/Thermal%20Control/hardware/introduction-to-thermoelectrics.pdf>  
Fecha de consulta: 22 de Enero de 2014
- [64] Citizen™ CUN-60 Instruction Manual  
Disponible en: <http://www.citizen-systems.co.jp>  
Fecha de consulta: 15 de Febrero de 2015
- [65] “Puente H (o H Bridge)”, García V., Electrónica Hispavila.  
Disponible en: <http://www.hispavila.com/3ds/atmega/hpuente.html>  
Fecha de consulta: 17 de Abril 2015
- [66] Zhang H., Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part I: Test/numerical model and validation, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, 2009, págs. 2022–2027.
- [67] Huang K. D. et al, “Air conditioning system of an intelligent vehicle cabin”, Applied Energy 83, 2006, pp. 545-557.
- [68] Kaynakli O., Kilic M., An investigation of thermal comfort inside an automobile during the heating period, Applied Ergonomics, 36, 2005, pp. 301–312.
- [69] Rouse M., Definición de *transparencia*, Computing fundamentals glosary, Junio 2010, TechTarget.  
Disponible en: <http://whatis.techtarget.com/definition/transparent>  
Fecha de consulta: 23 de Junio de 2015



# **APÉNDICES**

# APÉNDICE A - Matriz QFD

NECESIDAD	REQUERIMIENTO		ESPECIFICACIONES																Prioridad relativa	Importancia absoluta	
			Tiempo de operación [min]	Número de Sensores [#]	Rango de operación [°C], [%], [ppm]	Número de señales simultáneas [#]	Interfaz gráfica	Capacidad de almacenamiento [KB]	Tolerancia [°C], [%], [ppm]	Tiempo de respuesta [s]	Número de indicadores [#]	Número de controles [#]	Número de actuadores [#]	Intervención de usuarios	Velocidad de procesamiento [MHz]	Voltaje de alimentación [V]	Distancia con usuarios [m]	Tamaño (Volumen) [m <sup>3</sup> ]			Nivel de ruido [dB]
Que lea las variables	1	Monitoreo	5	5	5	5	5	3	1	5	5	0	0	3	5	0	0	0	1	5	240
Que registre las variables	2	Visualización y almacenamiento	3	3	0	5	5	5	0	3	5	5	0	3	3	0	0	0	0	4	160
Que sea confiable	3	Confiabilidad	0	0	5	5	0	0	5	5	0	0	1	0	5	5	3	0	0	5	170
Que sea de fácil manejo	4	Accesibilidad	0	0	0	1	5	0	0	0	3	5	0	5	0	0	0	1	0	3	60
Que modifique las variables	5	Modificación de variables	5	0	5	0	3	1	5	5	0	5	5	5	5	5	3	1	0	5	265
Que sea automático	6	Intervención de usuarios	0	0	0	0	5	0	0	0	5	5	1	5	0	0	3	0	0	3	72
Que sea rápido	7	Rapidez	5	3	0	5	1	1	3	5	3	3	5	0	5	1	0	0	0	5	200
Que sea seguro	8	Seguridad	1	0	3	0	0	0	3	5	0	0	3	0	1	5	5	3	3	3	96
Que no interfiera con las pruebas	9	Discreción	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	5	5	2	46
			19	14	18	21	24	10	17	28	21	23	20	21	24	16	19	10	9		

Dificultad técnica	1	3	1	3	5	1	3	5	3	3	5	1	5	3	3	5	3
Importancia absoluta	90	174	84	294	475	45	237	635	252	270	385	82	575	210	192	135	72
Importancia relativa	0.59	1.14	0.55	1.92	3.1	0.29	1.55	4.15	1.65	1.76	2.52	0.54	3.76	1.37	1.25	0.88	0.47

Nivel de relación	
Sin relación	0
Poca relación	1
Mediana relación	3
Alta relación	5

Importancia	
Mínima	1
Media	3
Máxima	5

Nivel de dificultad	
Mínima	1
Media	3
Máxima	5

Relación técnica	
■	Directa
□	Inversa

Prioridad de atención técnica	
■	Segunda prioridad de atención técnica
■	Tercera prioridad de atención técnica

## APÉNDICE B – Código del programa empleado por el Sistema de procesamiento

```
#include <DHT22.h>
const int NUMBER_OF_FIELDS = 6;
int fieldIndex = 0;
int values[NUMBER_OF_FIELDS];
//Sensores
int SEN1_PIN=10;
int SEN2_PIN=11;
//Actuadores temperatura
int pH1=4;
int pH2=3;
int vent1t=6;
int vent2t=5;
//Actuadores humedad
int humid=8;
int ventH=9;
//Actuadores CO2
int ventco2=7;
//Parámetros y constantes
float min_tempin=21.0;
float max_tempin=23.0;
float min_humin=45.00;
float max_humin=60.00;
float max_co2=2000.00;
float temperatura1, temperatura2, humedad1, humedad2;
float T, H;
double v_co2;
double co2_ppm;
double CC02;
boolean bandera=false;
char buffer[36];
int mintem, maxtem, minhum, maxhum;
float min_temp, max_temp, min_hum, max_hum;
DHT22 sensor1(SEN1_PIN);
DHT22 sensor2(SEN2_PIN);
int SEN_CO2;
//Configuración de entradas y salidas
void setup()
{
  pinMode(vent1t,OUTPUT);
  pinMode(vent2t,OUTPUT);
  pinMode(pH1,OUTPUT);
  pinMode(pH2,OUTPUT);
  pinMode(humid,OUTPUT);
  pinMode(ventH,OUTPUT);
  pinMode(ventco2,OUTPUT);
  digitalWrite(vent1t,LOW);
  digitalWrite(vent2t,LOW);
  digitalWrite(pH1,LOW);
```

```

digitalWrite(vent2t,LOW);
digitalWrite(pH1,LOW);
digitalWrite(pH2,LOW);
digitalWrite(humid,LOW);
digitalWrite(ventH,LOW);
digitalWrite(ventco2,LOW);
min_temp=min_tempin;
max_temp=max_tempin;
min_hum=min_humin;
max_hum=max_humin;
Serial.begin(9600);
while(Serial.available())
  Serial.read();
}
//Programa que se ejecutará cíclicamente
void loop()
{
  delay(4000);
  //Lectura sensores
  DHT22_ERROR_t errorCode;
  DHT22_ERROR_t errorCode2;
  errorCode = sensor1.readData();
  errorCode2 = sensor2.readData();
  SEN_CO2=analogRead(A5);
  if(errorCode == DHT_ERROR_NONE)
  {
    temperatur=sensor1.getTemperatureC();
    humedad1=sensor1.getHumidity();
    Serial.print(temperatur,2);
    Serial.print(" ~ ");
    Serial.print(humedad1,2);
    Serial.print(" ~ ");
  }
  if(errorCode2 == DHT_ERROR_NONE)
  {
    temperatura2=sensor2.getTemperatureC();
    humedad2=sensor2.getHumidity();
    Serial.print(temperatura2,2);
    Serial.print(" ~ ");
    Serial.print(humedad2,2);
    Serial.print(" ~ ");
  }
  //Manda lecturas al monitor
  T=temperatura_prom(temperatur,temperatura2);
  H=humedad_prom(humedad1,humedad2);
  CC02=concent_ppm(co2_ppm);

  Serial.print(T, 2);
  Serial.print(" ~ ");
  Serial.print(H, 2);
  Serial.print(" ~ ");

```

```

    Serial.println(CC02,2);
//Evalua estado del sistema
evalua_temp();
evalua_hum();
evalua_co2();
}
//Fija valores límite (dados por el usuario)
void serialEvent()
{
    while (Serial.available())
    {
        char ch = Serial.read();
        if(ch >= '0' && ch <= '9')
        {
            values[fieldIndex] = (values[fieldIndex] * 10) + (ch - '0');
        }
        else if (ch == ',')
        {
            if(fieldIndex < NUMBER_OF_FIELDS-1)
                fieldIndex++;
        }
        if (ch == '&')
        {
            min_temp=values[0];
            max_temp=values[1];
            min_hum=values[2];
            max_hum=values[3];
            max_co2=values[4];
            for(int i=0; i <= fieldIndex; i++)
            {
                values[i] = 0;
            }
            fieldIndex = 0;
        }
    }
}
//Obtiene valor de temperatura promedio
float temperatura_prom(float t1,float t2)
{
    float temp;
    temp=((temperatura1+temperatura2)/2);
    return temp;
}
//Obtiene valor de humedad promedio
float humedad_prom(float h1,float h2)
{
    float hum;
    hum=((humedad1+humedad2)/2);
    return hum;
}

```

```

//Obtiene valor de concentración de CO2 en ppm
double concent_ppm(float volt)
{
    v_co2=SEN_CO2*(5.0/1024);
    co2_ppm=((3.9561-v_co2)/0.0003);
    return co2_ppm;
}
//Función para evaluar la temperatura
void evalua_temp()
{
    if(T<min_temp)
    {
        analogWrite(vent1t,130);
        analogWrite(vent2t,90);
        digitalWrite(pH1,HIGH);
        digitalWrite(pH2,LOW);
    }
    if(T>max_temp)
    {
        analogWrite(vent1t,255);
        analogWrite(vent2t,205);
        digitalWrite(pH2,HIGH);
        digitalWrite(pH1,LOW);
    }
    if((T>=min_temp)&&(T<=max_temp))
    {
        digitalWrite(vent1t,LOW);
        digitalWrite(vent2t,LOW);
        digitalWrite(pH2,LOW);
        digitalWrite(pH1,LOW);
    }
}
//Función para evaluar la humedad relativa
void evalua_hum()
{
    if(H<min_hum)
    {
        if(bandera==false)
        {
            humidificador_on();
            analogWrite(ventH,50);
            bandera=true;
        }
        else
        {
            analogWrite(ventH,50);
            bandera=true;
        }
    }
    if((H>=min_hum)&&(H<=max_hum))

```

```

{
  if(bandera==false)
  {
    digitalWrite(ventH,LOW);
    bandera=false;
  }
  else
  {
    humidificador_on();
    digitalWrite(ventH,LOW);
    bandera=false;
  }
}
if(H>max_hum)
{
  if(bandera==false)
  {
    digitalWrite(ventH,LOW);
    bandera=false;
  }
  else
  {
    humidificador_on();
    digitalWrite(ventH,LOW);
    bandera=false;
  }
}
}
//Función para activar o desactivar el deshumidificador
void humidificador_on()
{
  digitalWrite(humid,HIGH);
  delay(10);
  digitalWrite(humid,LOW);
}
//Función para evaluar concentración de CO2
void evalua_co2()
{
  if(CCO2>max_co2)
  {
    digitalWrite(ventco2,LOW);
  }
  else
  {
    digitalWrite(ventco2,HIGH);
  }
}
}

```

## APÉNDICE C – Generalidades de los módulos termoeléctricos o celdas de Peltier

Los módulos termoeléctricos son conocidos también como celdas Peltier, ya que funcionan bajo el efecto descubierto por Jean Peltier, el cual establece que al pasar una corriente entre dos conductores eléctricos distintos, se produce una diferencia de temperatura en la unión de los materiales.

Una celda Peltier consiste en un arreglo de gránulos o *pellets* generalmente de Teluro de Bismuto dopados (tipo N o tipo P), conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, y conectados por uniones de material conductor. Tanto los pellets como las uniones conductoras son soportados por dos placas o sustratos cerámicos metalizados, formando una configuración en capas, como la que se muestra en la Figura AD.1a.

Cuando se aplica un voltaje al módulo, los portadores de carga de los pellets absorben calor de un lado del módulo, enfriando la placa cerámica correspondiente (cara fría) y liberando la energía absorbida a través de la superficie contraria (cara caliente), como se ilustra en la Figura AD.1b.

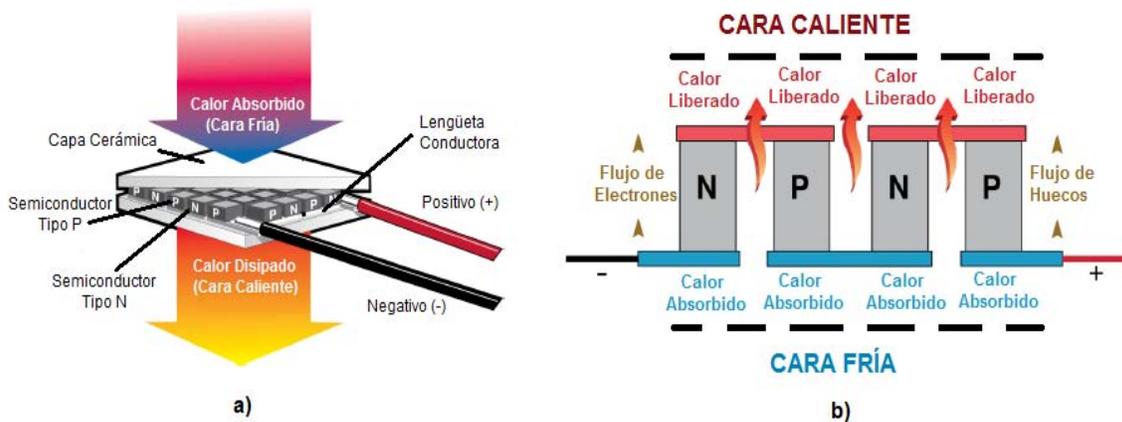


Figura AD.1 – a) Estructura del módulo termoeléctrico, b) Detalle de conexión de pellets en el módulo

A la hora de diseñar un sistema termoeléctrico, existen varios factores que deben considerarse, principalmente para la selección del módulo o celda a emplearse. Entre estos factores se encuentran: la temperatura a la que se quiere enfriar, o temperatura de la cara fría ( $T_C$ ), la cantidad de calor que se quiere remover o absorber ( $Q_C$ ), la temperatura ambiental esperada en la cual se encontrará inmerso el sistema o temperatura de partida ( $T_A$ ), la temperatura esperada en la cara caliente ( $T_H$ ), la cantidad calor que se deberá disipar ( $Q_H$ ), y la potencia eléctrica ( $P_E$ ) disponible para el módulo, es decir, las características de voltaje ( $V$ ) y corriente ( $I$ ) que se requerirán para obtener el desempeño deseado.

Asimismo, se consideran dos diferencias de temperatura que juegan un papel de vital importancia en el desempeño del sistema, la diferencia de temperatura efectiva ( $\Delta T_E$ ) que es la diferencia entre la temperatura de la cara fría y la cara caliente del módulo, como describe la ecuación 9; y la diferencia de temperatura del sistema ( $\Delta T_S$ ) que es la diferencia entre la temperatura ambiental y la temperatura de la carga a enfriar, o dicho de otra manera, la temperatura de entrada y la temperatura de salida del sistema, cuyo cálculo se ilustra en la ecuación 10.

$$\Delta T_E = T_H - T_C \quad (9)$$

$$\Delta T_S = T_{in} - T_{out} \quad (10)$$

## APÉNDICE D – Diagramas de circuitos impresos

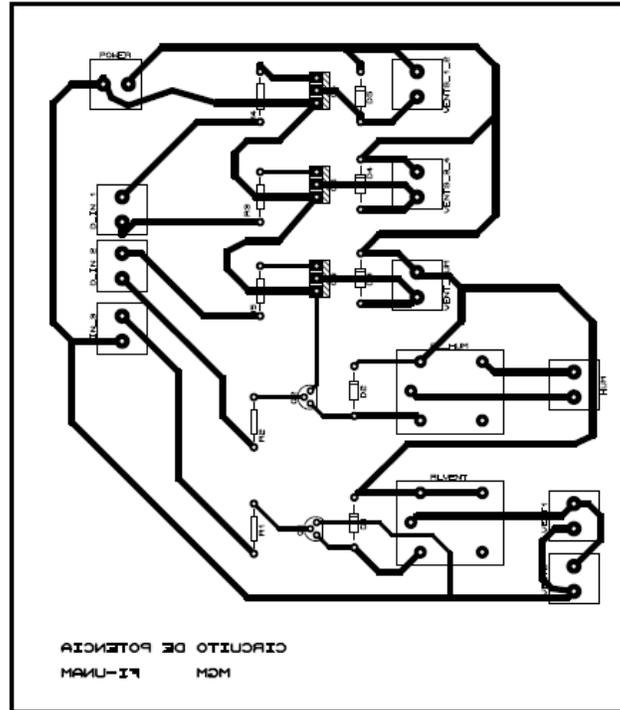


Diagrama de PCB- Etapa de potencia

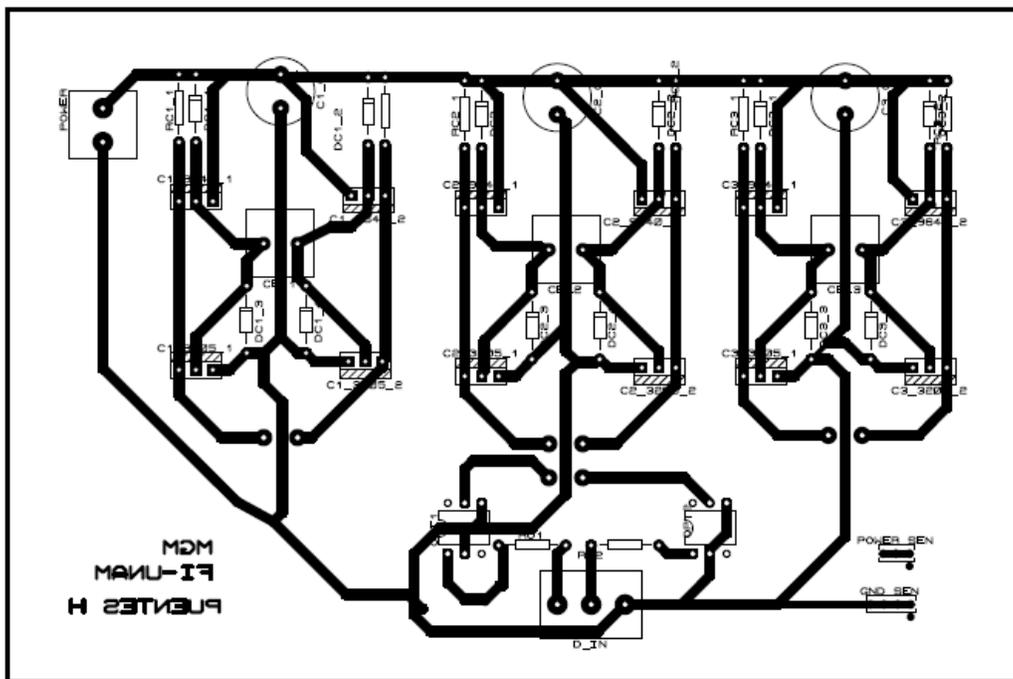
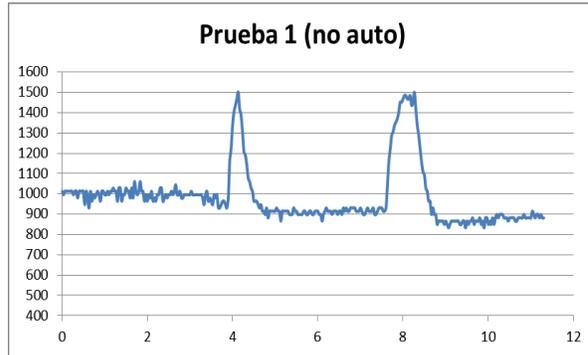
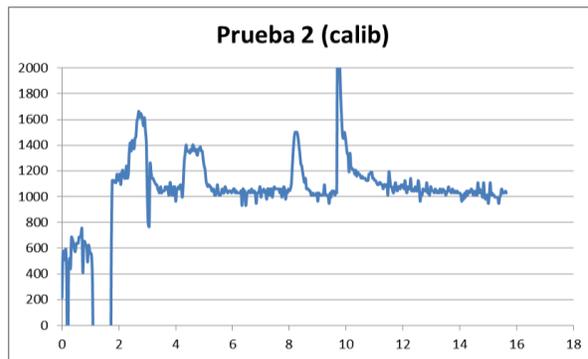


Diagrama de PCB- Puentes H para celdas Peltier

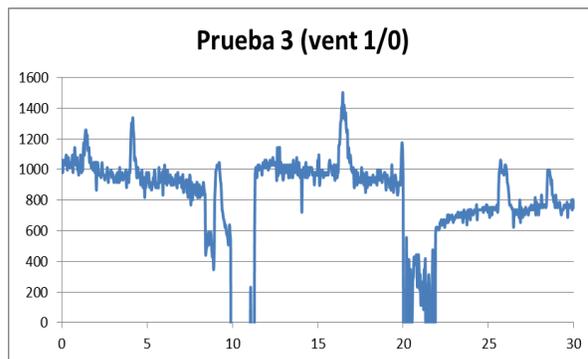
## APÉNDICE E – Resultados de pruebas de verificación del sensor MG811



Resultados de la primera prueba de verificación. En esta prueba el sensor se encontraba en un espacio abierto. Los picos representan una alta concentración, generada al respirar constantemente a una distancia mínima del sensor.



Resultados de la segunda prueba de verificación. En esta prueba el sensor se colocó en el interior del vehículo, en las mismas condiciones en que se colocó para las pruebas de calibración. Los picos representan una alta concentración, generada al respirar a una distancia mínima del sensor.



Resultados de la tercera prueba de verificación. En esta prueba el sensor se colocó en el interior del vehículo, las ventanas fueron reemplazadas por las que contienen los ventiladores (empleadas en las pruebas). Los picos representan una alta concentración, generada al respirar a una distancia mínima del sensor. La primera y tercera sección representan las lecturas realizadas con los ventiladores activos, mientras la sección intermedia representa las lecturas realizadas con los ventiladores