

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Estudio de un indicador del calentamiento atmosférico asociado a un equipo de AC en clima cálido extremo”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

**PEDRO ÁNGEL RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. NÉSTOR SANTILLÁN SOTO**

CO-DIRECTOR DE TESIS:

**DR. ALEJANDRO ADOLFO LAMBERT ARISTA**

MEXICALI B.C., A JUNIO DE 2024

## **DEDICATORIA**

A mí Madre, que me enseña todos los días a seguir adelante.

Adelante mejorándome primero a mí mismo,

con aprendizaje constante y alcanzado las metas que me proponga.

Me esforzaré por ayudar a otros.

Cuando me equivoque, me detendré y pensaré.

Cuando caiga, me levantaré y seguiré.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a continuación de manera especial:

Al Instituto de Ingeniería, por permitirme caminar en sus pasillos, conocer a personas interesantes y expandir mis conocimientos.

A CONACYT, por su invaluable apoyo para permitirme avanzar un paso.

A la Dra. Concepción, por enseñarme la importancia de los Ciclos y el Impacto.

Al Dr. David, por enseñarme la importancia de los Datos y el Cálculo.

Al Dr. Ricardo, por enseñarme la importancia de la Preparación y la Pasión.

A la Dra. Margarita, por enseñarme la importancia de los Detalles y la Distribución.

Al Dr. Alejandro, por enseñarme la importancia del Viento y los Modelos.

Al Dr. Néstor, por enseñarme la importancia del Sol y la Dedicación.

Gracias a mis Directores por abrirme las puertas al mundo de la ciencia.

Gracias a mi Madre por abrirme las puertas al mundo que me abrió las puertas al mundo de la ciencia.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Justificación .....	4
1.1.1. Hipótesis.....	6
1.2. Objetivos .....	6
1.2.1. Objetivo general.....	6
1.2.2. Objetivos particulares .....	6
CAPÍTULO II - ANTECEDENTES .....	8
CAPÍTULO III - MARCO CONCEPTUAL .....	15
3.1. Medio ambiente.....	15
3.2. Cambio climático.....	16
3.2.1. Calor extremo .....	16
3.2.2. Gases de efecto invernadero .....	17
3.3. Impacto de calentamiento equivalente total.....	18
3.3.1. Impacto directo .....	19
3.3.1.1. Gas refrigerante .....	19
3.3.1.2. Potencial de calentamiento global.....	19
3.3.2. Emisión de CO <sub>2</sub> equivalente .....	20
3.3.3. Impacto indirecto.....	20
3.3.3.1. Climatizador Unitario .....	21
3.3.3.2. Eficiencia energética .....	21
3.3.3.3. Coeficiente de Rendimiento.....	21
CAPÍTULO IV - METODOLOGÍA .....	23
4.1. Sitio experimental .....	23
4.2. Equipo experimental .....	24
4.2.1. Limpieza de equipo .....	25
4.3. Instalación de equipo en sitio .....	26
4.4. Instrumentos de medición y almacenamiento .....	27
4.4.1. Instalación de instrumentos de medición en equipo.....	28
4.4.2. Calibración de sensores HMP45AC .....	29
4.4.2.1. Condiciones de clima en condensador.....	31

4.4.2.2. Datos de tiempo de consumo .....	31
4.4.3. Estación Davis .....	32
4.5. Campañas experimentales.....	32
4.5.1. Selección de días de campaña .....	33
4.5.2. Acopio y procesamiento de datos.....	33
4.6. Carga y recuperación de gas refrigerante .....	34
4.6.1. Equipos e instrumentos .....	34
4.6.2. Instalación de válvulas de servicio .....	35
4.6.3. Procedimiento de carga y recuperación de refrigerante .....	36
4.6.3.1. Desconexión del Sistema: .....	36
4.6.3.2. Descarga inicial del refrigerante: .....	37
4.6.3.3. Calibración de báscula: .....	38
4.6.3.4. Recarga del refrigerante: .....	40
4.6.3.5. Ciclo de operación:.....	43
4.6.3.6. Repetición de ciclos:.....	43
4.6.3.7. Mediciones continuas: .....	44
4.7. Cálculos de TEWI.....	45
4.7.1. Impacto Directo .....	46
4.7.2. Impacto Indirecto.....	46
4.8. Temperatura de días típicos de temporada de verano.....	47
4.8.1. Humedad relativa.....	48
<b>CAPÍTULO V - RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>50</b>
5.1. Campañas experimentales - agosto .....	50
5.1.1. Campaña #1 .....	51
5.1.2. Campaña #2 .....	52
5.1.3. Promedio de campaña - agosto .....	53
5.1.4. Temperatura interior en condiciones extremas.....	54
5.2. Campañas experimentales - septiembre .....	56
5.2.1. Campaña #3 .....	56
5.2.2. Campaña #4 .....	57
5.2.3. Promedio de campaña – septiembre .....	58
5.3. Lecturas de presión posteriores a las recargas de refrigerante .....	59
5.4. Análisis de tiempos de enfriamiento .....	60

5.5. Resultados de temporada junio - septiembre.....	61
5.6. Impacto ambiental equivalente .....	64
<b>CAPÍTULO VI - CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
6.1. Recomendaciones para la metodología.....	69
6.2. Futuras investigaciones.....	69
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>76</b>

#### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación y dimensiones de sitio experimental. ....	24
Figura 2. Características proporcionadas por el proveedor.....	24
Figura 3. Clasificación de acondicionadores de aire tipo cuarto de acuerdo a la NOM-021-ENER-2017. ....	25
Figura 4. Limpieza de equipo experimental. ....	26
Figura 5. Instalación de equipo en sitio. ....	27
Figura 6. Representación de sensores instalados en equipo experimental.....	29
Figura 7. Gráfico de rango de aceptación de lectura de temperaturas en sensores HMP45AC. ....	30
Figura 8. Gráfico de rango de aceptación de lectura de humedad relativa en sensores HMP45AC. ....	30
Figura 9. Estación Davis en plataforma de estudios meteorológicos del Instituto de Ingeniería.....	32
Figura 10. Equipos representativos para proceso de carga y recuperación de gas refrigerante.....	35
Figura 11. Válvula de servicio tipo perforadora. ....	35
Figura 12. Equipo experimental posicionado sobre superficie plana elevada.....	37
Figura 13. Tanque de recuperación y bomba de vacío.....	38
Figura 14. Tanque de suministro posicionado sobre la báscula y manguera de manifold conectada.....	39
Figura 15. Reconexión de carátula de equipo AC, previo a la recarga de refrigerante.....	40
Figura 16. Recarga del 60% (0.384 kg) de refrigerante R410A en campaña #1. ....	41
Figura 17. Lectura de presión manométrica en línea de baja presión durante campaña #1...42	
Figura 18. Recarga parcial de 10% de refrigerante en campaña #1.....	44
Figura 19. Factores de emisión para el cálculo de emisiones indirectas 2000-2023. ....	47
Figura 20. Temperaturas horarias para un día típico de los meses de verano en Mexicali, B.C.....	48
Figura 21. Humedad relativa horaria para un día típico de los meses de verano en Mexicali, B.C.....	49
Figura 22. Resultados horarios de campaña experimental #1.....	51
Figura 23. Resultados horarios de campaña experimental #2.....	52

Figura 24. Consumo eléctrico horario promediado de las campañas experimentales del mes de agosto.....	53
Figura 25. Temperatura interior bajo condiciones extremas en campaña #1.....	54
Figura 26. Temperatura interior bajo condiciones extremas en campaña #2.....	55
Figura 27. Resultados horarios de campaña experimental #3.....	56
Figura 28. Resultados horarios de campaña experimental #4.....	57
Figura 29. Consumo eléctrico horario promediado de las campañas experimentales del mes de septiembre.....	58
Figura 30. Lecturas de presión manométrica posterior a los procesos de recarga de refrigerante.....	59
Figura 31. Consumo eléctrico en operación a diferentes niveles de refrigerante para días típicos de meses de verano 2023.....	63
Figura 32. Impacto total equivalente de temporada de verano 2023.....	64
Figura 33. Comparación de emisiones totales utilizando metodología convencional y propuesta.....	65

#### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Instrumentos de medición y almacenamiento.....	28
Tabla 2. Calendario de días de experimentación de proyecto.....	33
Tabla 3. Herramientas para recuperación y procesamiento de datos.....	34
Tabla 4. Conteo de encendidos totales respectivos a cada día y campaña experimental.....	61
Tabla 5. Resultados de análisis de datasets para diferentes niveles de refrigerante.....	62

## CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el cambio climático y sus efectos en el medio ambiente ha llevado a una mayor atención en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Uno de los sectores que contribuye significativamente a estas emisiones es el de climatización, especialmente en regiones con climas extremos donde el uso de sistemas de aire acondicionado es ampliamente requerido para proporcionar confort térmico en edificios. Mexicali, ubicada en una zona desértica con altas temperaturas y condiciones áridas, enfrenta desafíos significativos en términos de consumo de energía y emisiones de gases refrigerantes asociados a los sistemas de aire acondicionado.

En su último informe, la Organización Meteorológica Mundial comenta que existe un 66% de posibilidades de que, entre los años 2023 y 2027, superemos el límite de 1.5°C establecido en los acuerdos de París [1]. En México, se hace énfasis en las temperaturas máximas de hasta 50°C alcanzadas en Mexicali [2]. Estudios locales proyectan que la temperatura aumentará constantemente durante los próximos años [3]. Sumado a esto, el incremento en la población mundial está directamente relacionado a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De acuerdo con la Naciones Unidas [4], en México, el 80% de la población habita en áreas urbanas en 2018 y para 2050 se proyecta que será el 88%. En Baja California se espera un aumento en la población de 1.1 millones de habitantes para el 2050 [2] y se proyecta que a nivel local se alcancen los 1.2 millones de habitantes [5].

Debido al incremento de la población en zonas urbanas es posible esperar un incremento en la demanda de equipos de acondicionamiento de aire y con ello un aumento de la demanda de energía. Hoy en día, usar un equipo de acondicionamiento de aire (AC por sus siglas en inglés) para crear un ambiente confortable es una práctica común en el sector residencial, comercial e industrial. Lundgren-Kownacki et al. [6] esperan que el aumento en las demandas de refrigeración se centre más en las ciudades densas de rápido crecimiento en las regiones tropicales y subtropicales. Pavanello et al. [7] menciona que, tomando como base el 14% de la población que tenía un equipo de AC en 2016 en México, para el 2040 este porcentaje incrementará al 35-42%, lo que concuerda con metodologías locales que proyectan un incremento de entre el 22% y el 47% [8].

En México, el uso de sistemas comerciales de AC representa actualmente hasta el 50% del consumo de energía en las edificaciones, dependiendo de las condiciones climáticas de la región. Según Oropeza-Perez [9], en 2015 se reportó un consumo eléctrico de 11.854 GWh por la operación de estos sistemas. El Plan Estatal de Desarrollo comenta que existe un déficit energético en el Estado en temporada de verano [2] y el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático reconoce al municipio de Mexicali como el mayor consumidor de electricidad en la misma temporada en comparación con otras regiones [10].

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos estima que las emisiones globales de GEI en el sector de refrigeración, aire acondicionado y bomba de calor (HVAC por sus siglas en inglés) se incrementarán de 349 MtCO<sub>2</sub>e (dióxido de carbono equivalente) en 2010 a 1,596 MtCO<sub>2</sub>e en 2030 [11]. El Instituto Internacional

de Refrigeración (IIR) indicó que el sector de la refrigeración es responsable del 7.8% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, de los cuales el 37% son causados por escapes directos de refrigerantes y el 63% están relacionados con emisiones indirectas debido a la electricidad consumida [12]. En México se reportaron 18.5 MtCO<sub>2</sub>e en emisiones de gas refrigerante en 2019 [13], lo que concuerda con datos de la Agencia de Protección Ambiental para el mismo año y mismos que proyectan que esta cifra se duplique para 2050 [14].

Los datos mostrados indican que un incremento constante en las temperaturas y de población conllevan a la adquisición de más equipos operando durante periodos mayores. Esto se traduce en una mayor demanda de energía eléctrica requerida por los equipos AC y al incremento de la posibilidad de fugas de gas refrigerante durante la operación de los equipos. Ambas partes, la generación de energía eléctrica y los gases refrigerantes liberados a la atmósfera, impactan en el ambiente incrementando las temperaturas y el problema se convierte en un círculo vicioso. Por lo tanto, el acondicionamiento de espacios es una necesidad y calcular los impactos ambientales inevitables generados por equipos del sector HVCA es de vital importancia. Una de las metodologías más utilizadas a nivel internacional es la de Impacto Total Equivalente sobre el Calentamiento Atmosférico (TEWI por sus siglas en inglés) propuesta en 1993 por Steven Fischer [15]. TEWI actúa como un indicador del CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) generado por un equipo después de su instalación y hasta el final de su vida útil y está compuesto de una parte Directa y una Indirecta. La primera está relacionada directamente con el potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) del refrigerante utilizado, la cantidad que se libera a la atmosfera, principalmente por

fugas, y la cantidad que se pierde al final de su vida útil por un manejo de recuperación incorrecto. La segunda parte se ve influenciada en gran medida por el factor de conversión a CO<sub>2</sub> de la fuente de generación de energía y por la energía eléctrica necesaria para la operación del equipo AC.

Debido a que este indicador utiliza el consumo eléctrico especificado por el fabricante para obtener las emisiones indirectas, se desconocen los posibles efectos de las condiciones cálidas extremas y los niveles bajos de refrigerante en la operación de los equipos, efectos que tienen una variación interanual asociada a la variabilidad climática y su consideración contribuirá a tener una mejor estimación del impacto en el calentamiento atmosférico. Lo anterior significa que la variabilidad climática de corto plazo (interanual) debe considerarse para tener mayor certidumbre en la estimación de la contribuciones directa (CO<sub>2</sub> equivalente por la fuga del refrigerante) e indirecta (CO<sub>2</sub> asociado al consumo de energía) al determinar el TEWI.

### **1.1. Justificación**

La investigación propuesta es relevante debido a varios factores. En primer lugar, el aumento de la temperatura global y los efectos del cambio climático están generando condiciones extremas en diversas regiones del mundo, incluyendo ciudades como Mexicali, B.C., donde se experimentan veranos con temperaturas superiores a los 40°C. En estas condiciones, el uso de sistemas de aire acondicionado es fundamental para proporcionar confort térmico en edificios y garantizar la salud y el bienestar de los ocupantes.

Sin embargo, el uso de equipos de aire acondicionado conlleva importantes desafíos ambientales, especialmente en términos de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero. El sector de acondicionamiento de aire residencial es uno de los principales contribuyentes a estas emisiones, debido al uso de gases refrigerantes con alto potencial de calentamiento global y a la ineficiencia energética de muchos equipos.

Por lo tanto, es necesario robustecer la línea de investigación a nivel local para extender el conocimiento sobre el impacto ambiental de los sistemas de aire acondicionado en operación en clima extremo, y comenzar la búsqueda y aplicación de alternativas más sostenibles y eficientes.

Por otra parte, el uso del indicador TEWI (Total Equivalent Warming Impact) proporciona una herramienta valiosa para evaluar el impacto total de estos sistemas, considerando tanto las emisiones directas de los gases refrigerantes como las emisiones indirectas derivadas del consumo de energía. Por lo tanto, es importante investigar la subestimación potencial de las emisiones Indirectas debidas a la combinación de la operación en ambientes de alta temperatura y bajos niveles de refrigerante. Los resultados aquí presentados aportan bases para una propuesta de modificación en el indicador, lo que mejoraría significativamente las proyecciones de emisiones en futuras investigaciones.

Este estudio está enfocado en ser el primero a nivel local y regional en utilizar un indicador internacional para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero en equipos AC, específicamente del sector residencial. También será la primera

investigación a nivel nacional en utilizar el indicador TEWI como punto de referencia para proponer una metodología que calcule el SEWI (Impacto del calentamiento equivalente estacional) en investigación experimental bajo condiciones cálidas extremas. No se han encontrado investigaciones que utilicen el indicador TEWI ni SEWI relacionando datos experimentales a diferentes niveles de carga de gas refrigerante y exposición a altas temperaturas ambiente extremas en temporada de verano.

### **1.1.1. Hipótesis**

La metodología de TEWI para el cálculo teórico de emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante el tiempo de vida aproximado de operación de un equipo de acondicionamiento de aire residencial subestima las emisiones Indirectas excedentes debidas a la operación con carga deficiente de refrigerante y la operación en ambiente de altas temperaturas exteriores.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Cuantificar y analizar el SEWI (Impacto del calentamiento equivalente estacional) en un equipo de AC bajo diferentes regímenes de carga de refrigerante en clima cálido extremo.

### **1.2.2. Objetivos particulares**

1.- Calcular el excedente energético eléctrico de un equipo de aire acondicionado a diferentes porcentajes de la carga total de refrigerante.

2.- Analizar los excedentes energéticos bajo condiciones de temperaturas extremas.

3.- Obtener modelos de regresión lineal del consumo eléctrico a diferentes porcentajes de carga de refrigerante, considerando como variable independiente la temperatura ambiente a la entrada del condensador.

4.- Cuantificar el SEWI de temporada cálida relativo a los porcentajes de carga de refrigerante.

5.- Analizar la temperatura interior como un indicador de confort a diferentes porcentajes de la carga total de refrigerante.

## CAPÍTULO II - ANTECEDENTES

Tomando en cuenta los datos de las proyecciones del sector HVAC antes mencionadas, es necesario una breve revisión de las investigaciones que se han realizado en este sector, específicamente a la parte relacionada con los sistemas de AC en climas de ambiente de alta temperatura que competen al enfoque de esta investigación. Aunque dicho enfoque se centra en la relación de variables muy específicas de temperaturas de aire exterior, cargas de refrigerante fuera de diseño y metodología específica de cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub>e, diversas investigaciones en sistemas de AC han analizado otras variables tales como, tipo de refrigerante, comparación entre dispositivos de expansión, implementación de energías alternas, etc, y resultan de interés los diferentes enfoques por los que se puede atender una investigación en equipos de AC.

Una investigación experimental en Brasil [16] analizó el desempeño del equipo reemplazando el refrigerante R-22 por seis refrigerantes halogenados alternativos en un sistema de refrigeración de 5 toneladas. También se utilizó la metodología TEWI para analizar el impacto ambiental de cada refrigerante. Los resultados mostraron que los refrigerantes naturales presentaron el mejor coeficiente de desempeño y que los resultados para los HFC, con excepción del HFC-32, se mantuvieron por debajo de los del HCFC-22. En cuanto al impacto ambiental, utilizando el parámetro TEWI, los mejores resultados se alcanzaron con los hidrocarburos; mientras que el refrigerante HFC-404A presentó el mayor impacto ambiental.

Diversas investigaciones se enfocan en análisis de indicadores de desempeño de los equipos AC, relacionando cargas de refrigerante, diferentes dispositivos y temperaturas exteriores. Un estudio en California [17] recopiló datos de rendimiento de más de 13,000 acondicionadores de aire en edificios residenciales y comerciales y concluyó que el 57% de los sistemas estaban fuera de la especificación de nivel de refrigerante. Houcek y Thedford [18], probaron un sistema de 1.5 toneladas en condiciones de operación de estado estable para un 23% de carga insuficiente y sobrecarga del sistema a diferentes temperaturas exteriores que oscilaban entre los 21°C y 38°C. Aunque su objetivo era evaluar diferentes métodos de recarga de refrigerante, descubrieron que, para condiciones de carga insuficiente, la capacidad se redujo en un 23 % a 28°C y un 34 % a 35°C. Se observó que el aumento de la temperatura ambiente amplifica el efecto negativo de la reducción de carga en el rendimiento del sistema. Farzad y O'Neal [19] estudiaron en condiciones de ambiente controlado el efecto de una carga incorrecta sobre el desempeño de un acondicionador de aire Trane residencial de tres toneladas con expansión de tubo capilar y sin acumulador durante estado estacionario y operación cíclica. El sistema se probó con una sobrecarga y una carga insuficiente del 5 % al 25 %, así como con cuatro temperaturas exteriores (28°C, 32°C, 35°C y 38°C ). De manera similar a los estudios anteriores, encontraron que los indicadores de desempeño eran más sensibles a las condiciones de carga insuficiente que de sobrecarga.

Una de las recomendaciones del estudio de Farzad y O'Neal [20] indicaba la importancia de estudiar el efecto de diferentes dispositivos de expansión. Ya en 1981, Stoecker, Smith y Emde [21] habían encontrado que un sistema de AC residencial que

utiliza una válvula de expansión térmica (TXV por sus siglas en inglés) mostraba un COP superior del 2-3% que uno que emplea un tubo capilar como dispositivo de expansión. Una década más tarde, Farzard y Stoecker [22] amplían el análisis en condiciones controladas de laboratorio estudiando una unidad de aire acondicionado residencial de tres toneladas con refrigerante R-22 cargado en incrementos del 5 % desde -20 % a 20 % de la carga completa para cubrir la gama completa de condiciones de carga. En sus resultados encuentran que a una reducción del 10 % en la carga de refrigerante, el sistema de AC con TXV es un 13% más eficiente que el sistema con un tubo capilar.

A principios de la década de los 90's Farzad [22] amplía el análisis de su estudio anterior [20] utilizando modelos para comparar el efecto de la carga de refrigerante en el rendimiento del sistema para tres dispositivos de expansión los cuales fueron, tubo capilar, TXV y orificio de tubo corto. Concluyó que el sistema que usaba un tubo capilar era más sensible a la carga fuera de diseño que el sistema que utiliza la TXV o el orificio de tubo corto. Sin embargo, para el rango de carga probado, el rendimiento del sistema con la TXV y el orificio del tubo corto dependían en gran medida de la temperatura del aire exterior. Adicionalmente, Rodríguez [23] amplió los rangos de temperatura y carga de refrigerante fuera de diseño del estudio de Farzad [22], sobre los dos sistemas que utilizan el orificio de tubo corto y la TXV, para incluir temperaturas exteriores de hasta 49°C y niveles de carga de -40% a +30% de la nominal. El estudio ampliado mostró que una reducción de carga de más del 20 % provocó una fuerte disminución en la capacidad del sistema y el EER, mientras que la

sobrecarga del sistema en más del 20 % no tuvo mucho impacto en el rendimiento del sistema.

Goswami et al. [24] probó un sistema de aire acondicionado residencial de 3 toneladas con un dispositivo de expansión de orificio y usando R-22 para reducir la carga hasta el 50% de la carga óptima a una temperatura exterior de 35°C. Descubrieron que para un 10 % de reducción de la carga, la capacidad disminuye un 3.5% mientras que el COP aumenta un 2%. Este aumento de COP no coincide con la tendencia esperada en base a estudios previos, lo que puede deberse a la incertidumbre en las mediciones.

Herbert y Mohal [25] comentan que la capacidad de enfriamiento, la potencia del compresor y la eficiencia del sistema dependen de la carga de refrigerante y las condiciones exteriores. Kim y Braun [26] realizaron un estudio extenso sobre seis sistemas de aire acondicionado residenciales diferentes, con diferentes combinaciones de dispositivos y utilizando dos refrigerantes (R-22 y R-410A) a diferentes temperaturas exteriores. Para todos los sistemas considerados en este estudio, una reducción de la carga de refrigerante del 25 % condujo a una reducción promedio de la eficiencia energética de alrededor del 15 % y una degradación de la capacidad de alrededor del 20 %. Concluyeron que para sistemas con un orificio de expansión fijo (FXO por sus siglas en inglés), el acumulador tuvo poco impacto en el efecto de degradación de carga en la capacidad. En cuanto a los sistemas que utilizan dispositivo TXV, encontraron que por debajo de un límite de carga del 70 % de la carga nominal, el dispositivo TXV comienza a operar de manera similar a la FXO a medida que la TXV se abre por completo.

En los resultados de Yusof [27] se expone que a medida que la temperatura exterior aumentó de 30 °C a 36 °C, la capacidad de enfriamiento y la eficiencia cayeron un 3,7 % y un 10,9 % respectivamente. Deymi-Dashtebayaz [28] describe en sus resultados que, con el aumento de la temperatura ambiente de 27 °C a 45 °C, la tasa de eficiencia energética disminuye en un 30 %.

Como se observa, los estudios presentados no hacen referencia al impacto medio ambiental en sus resultados. Estudios locales sobre el consumo eléctrico que sí exploran este impacto y su equivalencia en emisiones de gases de efecto invernadero pero que no toman en cuenta la emisión de gases refrigerantes a la atmósfera se muestran a continuación.

En su tesis de Maestría, Reyes [29] analiza el consumo eléctrico basado en los electrodomésticos de 200 viviendas en las ciudades de Mexicali y Hermosillo donde se concluye que Mexicali consume 17% más energía debido al aire acondicionado. Santillán et.al [30] realiza una evaluación energética de equipos de 4 toneladas en Instituto y conjunto residencial y proporciona datos de impacto ambiental debido al consumo eléctrico. Suestegui et.al [31] analiza el impacto energético de equipos de aire acondicionado en 300 hogares en Mexicali mediante trabajo de campo y encuestas. Un aporte importante de la anterior investigación es que proporciona datos sobre diversidad de equipos y eficiencias que podrían utilizarse para hacer una evaluación de impacto ambiental. Nuevamente, Santillán et.al. [32] realiza una evaluación energética y económica pero esta vez en equipos AC de 5 toneladas en dos zonas urbanas. Al final Incluye datos de impacto ambiental por energía consumida

y sus equivalentes en diferentes acciones que generan emisiones de gases de efecto invernadero.

El único trabajo encontrado realizado localmente y relacionado a la emisión de gases refrigerantes a la atmósfera es el publicado por Calderas et. al. [33]. En este trabajo se observa la transición de gases refrigerantes en 600 registros. En 2006 y 2007, el gas R-11 seguía presente en los equipos AC en un 22% y 21% respectivamente. En 2008 el uso de gas R-11 cae a 2%. Aunque este trabajo muestra una clara transición a nuevas tecnologías en su tiempo, al día de hoy el gas refrigerante R-22 ya fue reemplazado por el R410A, que es el más utilizado actualmente en el sector residencial en países en vías de desarrollo. Este último gas refrigerante ya está siendo desplazado en países desarrollados por gases con bajo GWP. La desactualización en el tema de gases refrigerantes en diferentes tecnologías y aplicación deja un hueco para retomar la línea de investigación, sobre todo en una zona con alta necesidad de uso de equipos AC para el acondicionamiento de espacios.

Por último, se mencionan los trabajos del único equipo de investigadores encontrado a nivel nacional en utilizar el indicador TEWI en tecnologías de ciclo de compresión de vapor. Belman-Flores lidera una serie de investigaciones [34][35][36][37] enfocadas a la evaluación de varios gases refrigerantes de bajo GWP que reemplacen al gas R134a en refrigeradores domésticos. En sus estudios experimentales encuentra excelentes candidatos para reemplazar al gas actualmente utilizado y finaliza con una comparación de impacto medio ambiental utilizando TEWI. Aún el indicador utilizado en estas investigaciones es el mismo propuesto en este proyecto de Maestría, los gases refrigerantes y las aplicaciones no son comparables y

por lo tanto se encuentra una oportunidad de utilizar TEWI en tecnologías de acondicionamiento de aire.

Las tendencias generales observadas nos muestran que los principales factores que influyen en el desempeño de los equipos de AC y por lo tanto en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) equivalentes son la temperatura ambiente y el nivel de refrigerante para la parte Indirecta y el tipo de refrigerante para la parte Directa de TEWI. Aunque no se encontraron estudios de equipos de AC a nivel local ni en la región norte de México, de la literatura aquí presentada se observa que varios estudios fueron realizados las zonas tropicales y subtropicales a nivel global, siendo el sur de Estados Unidos la zona más cercana a la ciudad en la que se realiza este proyecto, la cual cuenta con temperaturas similares en temporadas de verano. Estudios locales que retomen y actualicen la línea de investigación son necesarios para visualizar el impacto ambiental del sector HVAC doméstico.

## **CAPÍTULO III - MARCO CONCEPTUAL**

La aportación del sector de refrigeración y aire acondicionado al cambio climático se ha estudiado ampliamente en las últimas décadas. Debido a su importancia se definen a continuación algunos conceptos claves en el tema de estudio entre los cuales se encuentran calor extremo, gases de efecto invernadero, así como conceptos relacionados a la metodología utilizada para el análisis de emisiones en equipos de acondicionamiento de aire.

### **3.1. Medio ambiente**

Principalmente debemos mencionar al medio ambiente como eje central en el tema de estudio, debido a que es justo su protección el objetivo principal de este estudio.

Para Salvador [44] el medio ambiente es el sitio donde podemos existir y el cual nos ofrece recursos necesarios para mejorar nuestra vida, pero al mismo tiempo, es un sitio limitado en el que deseamos los recursos que ya hemos utilizado.

La perspectiva de Salvador resalta la interdependencia entre los seres humanos y el medio ambiente, resaltando la importancia de reconocer y valorar los recursos naturales que sustentan nuestra existencia. Su visión remarca la necesidad de adoptar prácticas sostenibles que permitan el uso responsable de estos recursos finitos, así como la gestión adecuada de los residuos generados por nuestras actividades.

### **3.2. Cambio climático**

Aunque los cambios en el medio ambiente han sucedido de manera natural a través del tiempo, los cambios más significativos han comenzado a suceder de manera acelerada debido a las actividades del ser humano y se han convertido en una problemática. De manera práctica, la Organización Mundial de la Salud (OMS) lo define como “la mayor amenaza para la salud que enfrenta la humanidad” [45].

En relación exclusiva con la presencia del humano, en su artículo 1, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) [46] define al cambio climático como:

“Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.”

Al definir el cambio climático como un fenómeno atribuible directa o indirectamente a la actividad humana, la CMNUCC destaca la necesidad urgente de abordar las emisiones de gases de efecto invernadero y adoptar medidas para mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático. Esta definición refleja la comprensión científica actual y proporciona un marco claro para la acción internacional en la lucha contra el calentamiento global y sus consecuencias.

#### **3.2.1. Calor extremo**

Aunque en la ciudad de Mexicali las condiciones de calor extremo son históricas y normales en temporada de verano, se espera que la temperatura siga

incrementando, incluso en la temporada de invierno. Esto incrementará el riesgo de enfermedades asociadas a altas temperaturas como la fatiga o el golpe de calor.

Según los Centros para el control y la prevención de enfermedades (CDC por Centers for Disease Control and Prevention), el calor extremo se define como “temperaturas de verano mucho más altas o condiciones mucho más húmedas que las registradas en promedio y se relacionan con enfermedades como como el agotamiento o el golpe de calor” [47].

El aumento de las temperaturas en la ciudad de Mexicali es una preocupación creciente, ya que no solo afecta el confort humano. Esta condición de clima extremo plantea desafíos significativos en términos de salud pública y bienestar comunitario.

### **3.2.2. Gases de efecto invernadero**

De manera resumida, la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por Environment Protection Agency), les llama gases de efecto invernadero (GEI) a los “gases que atrapan el calor en la atmósfera” [48].

De manera más desarrollada, en su último informe [49], el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por Intergovernmental Panel on Climate Change) define a estos gases como:

“Constituyentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación emitida por el océano y la superficie terrestre de la

Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad provoca el efecto invernadero.”

Este último concepto es importante de entender debido a que en la actualidad estos gases son los mayores contribuyentes al cambio climático y son generados en su mayoría por el ser humano.

La siguiente sección incluye principalmente definiciones que son exclusivas del sector de la refrigeración y aire acondicionado.

### **3.3. Impacto de calentamiento equivalente total**

La problemática del cambio climático y el incremento en las temperaturas es una realidad y el uso de equipos acondicionadores de aire es ahora más que nunca una necesidad. Por lo tanto, es necesario medir el impacto causado por la necesidad actual. Una metodología que se concentra en el cálculo del impacto generado por los equipos de acondicionamiento de aire es la de Impacto de Calentamiento Equivalente Total (TEWI por Total Equivalent Warming Impact)

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers) [50] citando a Fischer et. al. 1991, define la metodología TEWI como “la suma de las emisiones directas de refrigerante expresadas en términos de equivalentes de CO<sub>2</sub> y las emisiones indirectas de CO<sub>2</sub> del uso de energía del sistema durante su vida útil”.

### **3.3.1. Impacto directo**

Entrando a la parte directa de la metodología TEWI, es necesario atender algunas de las definiciones más relevantes.

#### **3.3.1.1. Gas refrigerante**

En primer lugar, el fluido de trabajo es la parte fundamental del impacto directo. La ASHRAE [50] menciona a los gases refrigerantes como “los fluidos de trabajo en los sistemas de refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor.” Absorben el calor de un área, como un espacio con aire acondicionado, y lo expulsan a otra, como al aire libre, generalmente a través de la evaporación y la condensación, respectivamente.

#### **3.3.1.2. Potencial de calentamiento global**

El Potencial de Calentamiento Global proporciona una unidad de medida común, que permite a los analistas sumar estimaciones de emisiones de diferentes gases (por ejemplo, para compilar un inventario nacional de GEI) y permite a los formuladores de políticas comparar las oportunidades de reducción de emisiones entre sectores y gases.

Para la EPA [51], “es una medida de cuánta energía absorberán las emisiones de 1 tonelada de un gas durante un período determinado de tiempo, en relación con las emisiones de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Cuanto mayor sea el GWP, más calentará la Tierra un gas dado en comparación con el CO<sub>2</sub> durante ese período de tiempo. El período de tiempo que se suele utilizar para los GWP es de 100 años.”

### **3.3.2. Emisión de CO<sub>2</sub> equivalente**

El IPCC define las emisiones equivalentes de la siguiente manera [52]:

“La cantidad de emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que causaría el mismo forzamiento radiativo integrado o cambio de temperatura, durante un horizonte de tiempo determinado, como una cantidad emitida de un gas de efecto invernadero (GEI) o una mezcla de GEI. Hay varias formas de calcular dichas emisiones equivalentes y elegir horizontes de tiempo apropiados. Por lo general, la emisión de CO<sub>2</sub> equivalente se obtiene multiplicando la emisión de un GEI por su potencial de calentamiento global (GWP) para un horizonte temporal de 100 años. Para un mix de GEI se obtiene sumando las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente de cada gas. La emisión de CO<sub>2</sub> equivalente es una escala común para comparar las emisiones de diferentes GEI, pero no implica la equivalencia de las correspondientes respuestas al cambio climático. Por lo general, no hay conexión entre las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente y las concentraciones de CO<sub>2</sub> equivalente resultantes.”

Esta equivalencia es la internacionalmente aceptada. El concepto de CO<sub>2</sub> equivalente es aplicado a reportes internacionales, investigaciones, en planes estratégicos nacionales y se utiliza en los objetivos de reducción a los que se compromete cada país en los diferentes acuerdos.

### **3.3.3. Impacto indirecto**

La parte indirecta de la metodología TEWI hace solo referencia a la tecnología utilizada para acondicionar aire y a su desempeño. En esta sección, solo se hará

referencia solo al equipo y al indicador de desempeño utilizados para este proyecto de estudio.

### **3.3.3.1. Climatizador Unitario**

Para el Instituto de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración (AHRI por Air Conditioning, Heating and Refrigeration Institute) [53] los climatizadores unitarios son “dispositivos de enfriamiento que normalmente incluyen serpentines interiores, compresores, serpentines exteriores, ventiladores interiores, ventiladores exteriores y dispositivos de expansión.”

### **3.3.3.2. Eficiencia energética**

Cuando se habla de eficiencia, comúnmente nos referimos a utilizar un equipo que consuma menos energía para conseguir el mismo rendimiento o realizar la misma función.

Para el IPCC, la eficiencia energética se define como [49]:

“La relación de salida o energía útil o servicios energéticos u otras salidas físicas útiles obtenidas de un sistema, proceso de conversión, actividad de transmisión o almacenamiento a la entrada de energía.

Por supuesto, equipos nuevos tendrán mayores eficiencias debido al avance tecnológico.

### **3.3.3.3. Coeficiente de Rendimiento**

Por último, aun cuando el objetivo no es evaluar eficiencia en equipos de acondicionamiento de aire, es importante conocer el indicador de desempeño principal.

AHRI define este coeficiente (COP por Coeficient Of Performance) como “Una relación entre la capacidad de refrigeración/calefacción en vatios y los valores de potencia de entrada en vatios en cualquier conjunto dado de condiciones nominales expresadas en vatios/vatio (una cantidad adimensional).” [35]

Otros indicadores son ampliamente utilizados en investigaciones y reportes internacionales, pero TEWI utiliza los factores más importantes a analizar en materia de desempeño como lo menciona la anterior definición.

## **CAPÍTULO IV - METODOLOGÍA**

Se presenta en este capítulo la metodología para la medición de consumo eléctrico de un equipo AC de ventana de 1 tonelada operando con diferentes niveles de refrigerante en ambiente de temperaturas cálidas extremas. En el transcurso de cuatro campañas experimentales se calculó el impacto ambiental debido a la generación de energía necesaria para la operación del equipo. Posteriormente se evaluó la relación entre la demanda energética obtenida y las variables meteorológicas de microclima a la entrada del condensador.

Adicionalmente, se calculó el impacto ambiental equivalente total de temporada (SEWI), en el que se integran las emisiones equivalentes debidas a las fugas simuladas durante la experimentación. Estos resultados de impacto ambiental equivalente por temporada difieren del uso común del indicador TEWI utilizado para evaluar todo el ciclo de vida del equipo AC.

### **4.1. Sitio experimental**

La experimentación se realizó en una oficina del Laboratorio de Ciencias Atmosféricas Aplicadas del Instituto de Ingeniería. La ubicación geográfica y las dimensiones de la oficina se muestran en la Figura 1.

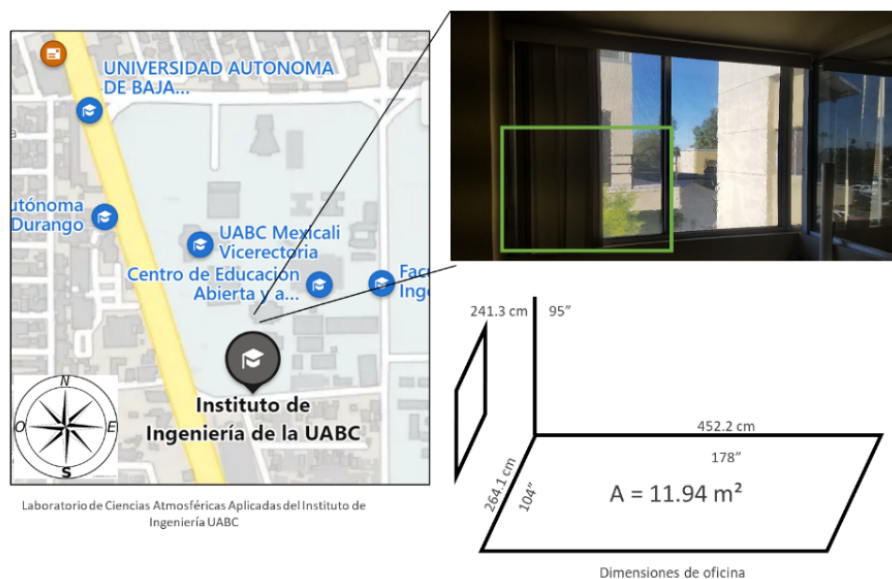


Figura 1. Ubicación y dimensiones de sitio experimental.

El equipo experimental se instaló en la ventana con orientación oeste marcada con recuadro verde (Fig. 1) aproximadamente a unos 8m de altura.

#### 4.2. Equipo experimental

Los datos del equipo AC utilizado se muestran a continuación en la Figura 2.

Marca	Neoaire
Tipo	De ventana
Modelo	NAW121
Fase	110-115v – 60Hz
Capacidad	12,000 BTU
Consumo frio	1,210W
Refrigerante	R-410A
Carga de refrigerante	640g

Figura 2. Características proporcionadas por el proveedor.

De estos datos los más relevantes son el consumo, el tipo de refrigerante utilizado y la cantidad de refrigerante para este equipo.

De acuerdo a la NOM-021-ENER-2017 [54], este equipo pertenece a la clase 3 debido a su capacidad de enfriamiento de acuerdo con el fabricante (Fig.3).

TIPO	CLASE	CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO en Wt
sin ciclo inverso y con ranuras laterales	1	menor o igual que 1 758
	2	mayor que 1 758 hasta 2 344
	3	mayor que 2 344 hasta 4 103
	4	mayor que 4 103 hasta 5 861
	5a	mayor que 5 861 hasta 8 205
	5b	mayor que 8205

*Figura 3. Clasificación de acondicionadores de aire tipo cuarto de acuerdo a la NOM-021-ENER-2017.*

#### 4.2.1. Limpieza de equipo

Previo a la experimentación, se realizó limpieza del equipo a las afueras del Instituto de Ingeniería para asegurar la operación en la mejor de las condiciones. Se utilizó agua presurizada para la limpieza de los intercambiadores de calor (evaporador y condensador) con el fin de evitar la aplicación de ácido comercial comúnmente utilizado en servicios de mantenimiento. Con esto se evita daño al recubrimiento en los paneles de los intercambiadores.



*Figura 4. Limpieza de equipo experimental.*

### **4.3. Instalación de equipo en sitio**

Se retiraron las persianas frontales y la malla anti insectos de la ventana indicada en la Figura 1. En la zona de la pared conjunta al marco de la venta se instaló una base de madera. En la misma base se instaló solo la caja de lámina para poder montar y desmontar únicamente la parte interior del equipo para los procesos de carga y recuperación de gas refrigerante. Se terminó de cerrar el espacio superior de la ventana con placa de madera de  $\frac{1}{2}$  in y se deslizó la parte interna del equipo dentro de la caja de lámina (Fig. 5).



*Figura 5. Instalación de equipo en sitio.*

Para la instalación eléctrica, primero se ensambló una extensión de 2m de cable de uso rudo calibre 12 como medida de seguridad para el equipo AC. La extensión se conectó a una fuente de 127v en el interior del Instituto de Ingeniería. Se elevaron los cables de la extensión y del equipo aproximadamente 30cm del suelo para evitar desconexiones accidentales.

#### **4.4. Instrumentos de medición y almacenamiento**

Los instrumentos para lecturas y almacenamiento de datos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Instrumentos de medición y almacenamiento.

Lectura	Instrumento	Marca	Presición	
<b>Corriente</b>	SCT-019-200	YHDC	±1%	
<b>Temperatura</b>	HMP45AC	Campbell Scientific	A 20°C	±0.2°C
			A 40°C	±0.3°C
<b>Humedad relativa</b>			De 0% a 90%	±2%
<b>Almacenamiento</b>	CR3000 datalogger	Cambell Scientific		

#### 4.4.1. Instalación de instrumentos de medición en equipo

Se colocaron los instrumentos de medición de temperatura, humedad y corriente como lo muestra de manera representativa la Figura 6. Como acción preventiva, debido al posible funcionamiento incorrecto de los instrumentos ó anomalías en los datos, estos se revisan diariamente durante las campañas. Los datos son transferidos a un equipo de cómputo al final de cada campaña experimental.

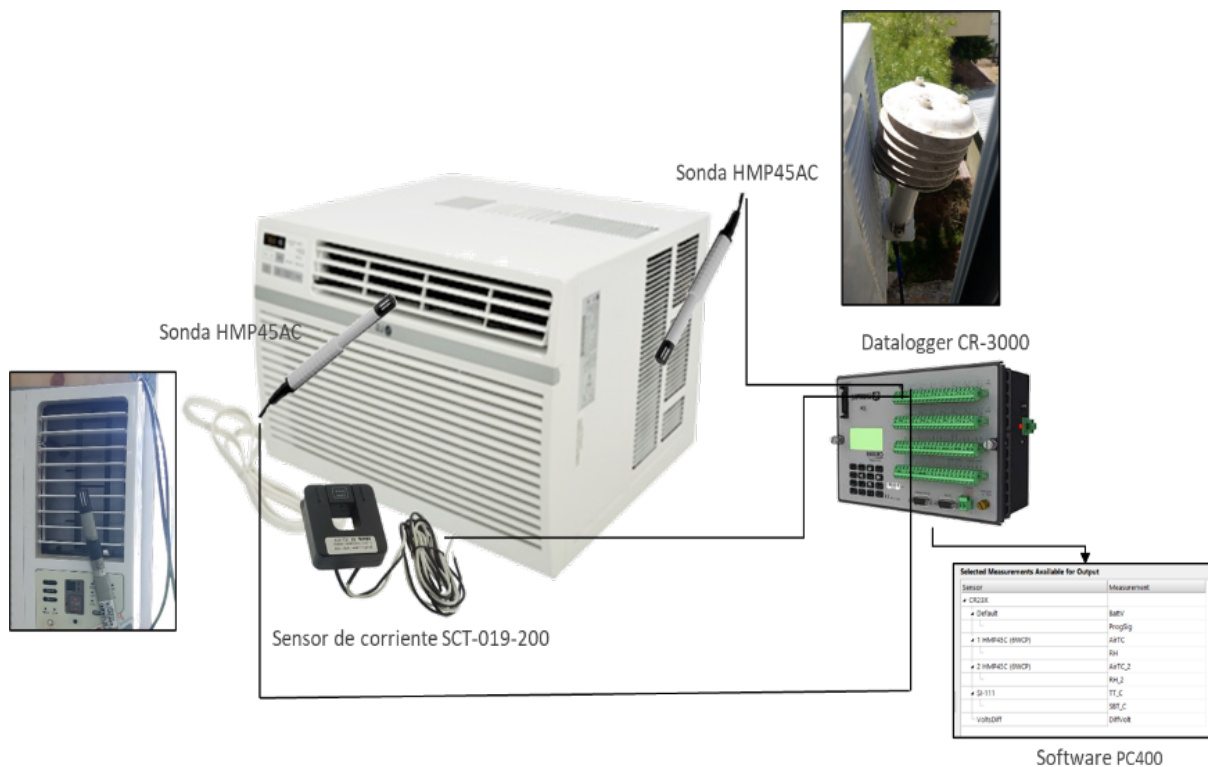


Figura 6. Representación de sensores instalados en equipo experimental.

#### 4.4.2. Calibración de sensores HMP45AC

Para la calibración de los sensores de temperatura y humedad relativa, se posicionaron en el laboratorio de Ciencias Atmosféricas Aplicadas a una distancia menor a 5cm y se obtuvieron datos en intervalos de 5 segundos diez días (de 27/04/23 a 05/05/23), siendo un total de 59,665 datos de temperatura promedio y la misma cantidad para humedad relativa máxima.

Para los datos de temperatura, se restaron las lecturas de ambos sensores para obtener la diferencia en una nueva columna de datos. Posteriormente se filtraron los datos a un rango de  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$  de diferencia entre las lecturas de cada sensor y se obtuvieron 59,411 nuevos datos, representando una similitud del 99.57% del total.

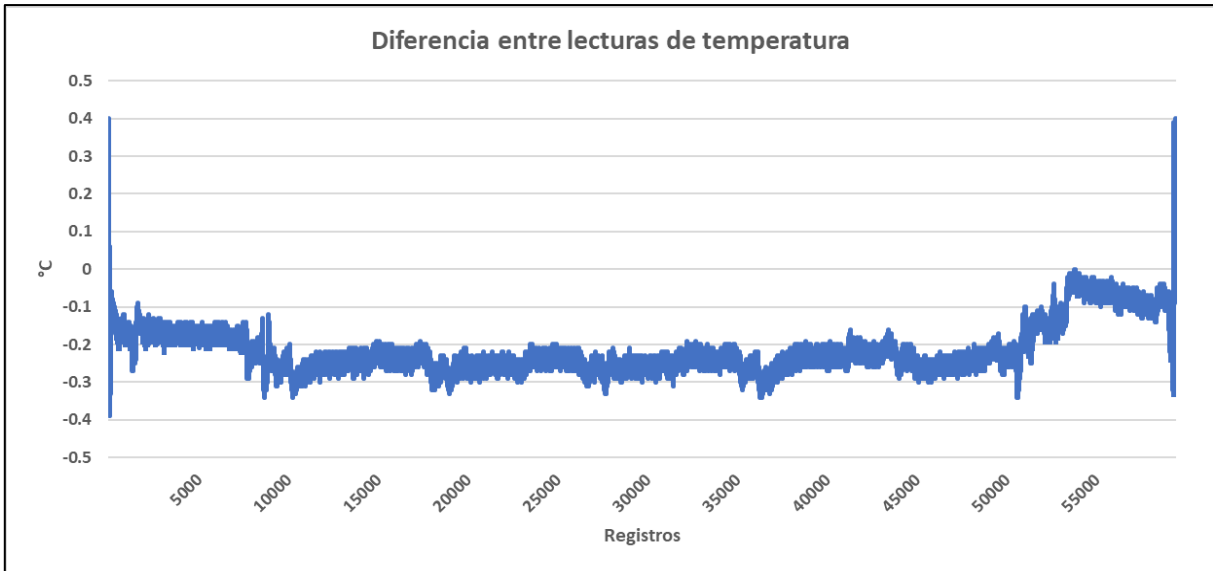


Figura 7. Gráfico de rango de aceptación de lectura de temperaturas en sensores HMP45AC.

Para la humedad relativa se repitió la primera parte del manejo anterior y se aplicó un filtro de  $\pm 0.8\%$  de diferencia entre las lecturas. Se obtuvieron 59,147 nuevos datos, representando así una similitud del 99.13% del total.

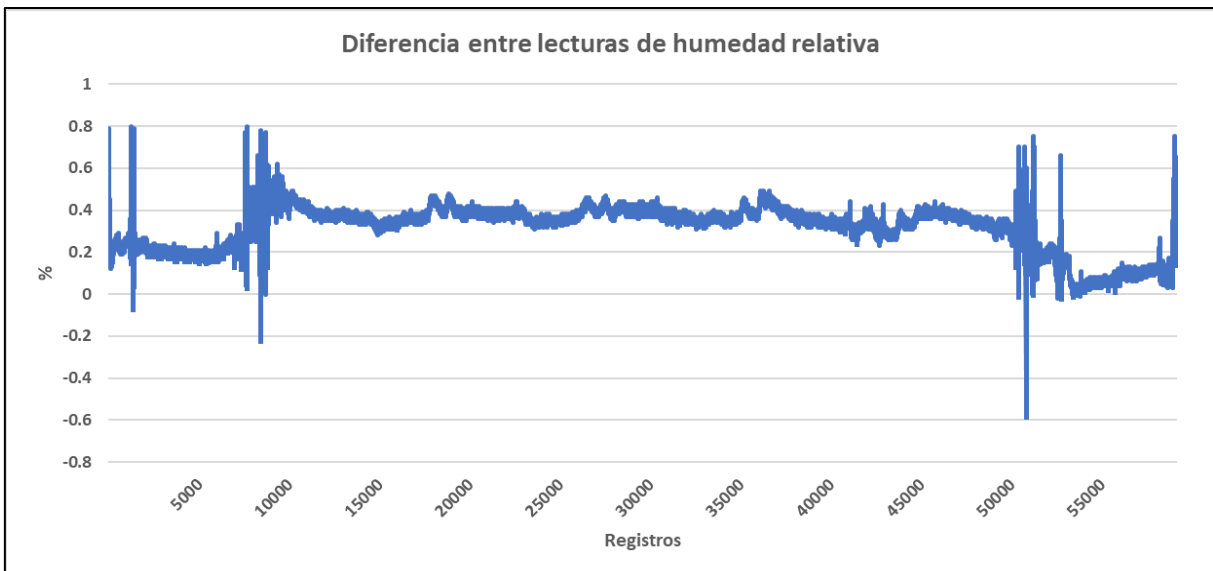


Figura 8. Gráfico de rango de aceptación de lectura de humedad relativa en sensores HMP45AC.

Se estima que la variación en los datos pudo deberse a manipulación necesaria de los sensores debido a ocupación de espacio en el laboratorio.

#### **4.4.2.1. Condiciones de clima en condensador**

Un sensor HMP45AC se colocó a la entrada de aire del condensador del equipo para medir las variables de temperatura y humedad relativa. De estas mediciones se obtienen datos para evaluar la existencia de posibles condiciones de microclima alrededor del equipo durante su operación y así evaluar la relación de estas variables meteorológicas con el consumo eléctrico.

Adicionalmente, se instaló un sensor HMP45AC a la salida de aire después del enfriamiento en el evaporador para observar la temperatura de enfriamiento con el objetivo de relacionarla con la capacidad para proporcionar un confort térmico adecuado.

#### **4.4.2.2. Datos de tiempo de consumo**

Para obtener el consumo eléctrico del equipo se instaló alrededor del cable de extensión un sensor de corriente SCT-019-200 y se conectó al datalogger CR3000 (cable blanco a 5H, cable negro a Tierra). Una vez encendido el equipo AC, el sensor obtiene datos de corriente en intervalos de 5 segundos con el objetivo de visualizar los tiempos de entrada y salida del compresor para el cálculo de consumo total diario. Con estos mismos datos es posible encontrar relaciones con variables meteorológicas, principalmente temperatura y humedad relativa exteriores.

#### 4.4.3. Estación Davis

Se instaló una estación meteorológica Vantage Pro2 Plus del proveedor Davis en la plataforma de estudios meteorológicos del Instituto de Ingeniería a una altura media aproximada de 15m con respecto al suelo del edificio. Los datos de temperatura y humedad relativa obtenidos de la estación meteorológica se utilizan en la etapa de Resultados como apoyo para la evaluación mencionada en la sección 4.4.2.1.



*Figura 9. Estación Davis en plataforma de estudios meteorológicos del Instituto de Ingeniería.*

#### 4.5. Campañas experimentales

Se realizaron cuatro campañas experimentales con plazos de cinco días por campaña, equivalente a un día experimental por nivel de refrigerante. Una campaña piloto fue realizada en el mes de mayo para someter a prueba los equipos y

procedimientos de carga y recuperación. Las campañas experimentales para la generación y procesamiento de datos para la presentación de resultados se realizaron durante los meses de agosto y septiembre.

#### 4.5.1. Selección de días de campaña

Los días de campaña se seleccionaron por medio de pronóstico observando un horizonte de cinco días consecutivos con ayuda laboratorio de Ciencias Atmosféricas Aplicadas del Instituto de Ingeniería. Los criterios para la selección de días de campaña son principalmente condiciones soleadas y con vientos ligeros (menores a 10 km/h). El calendario experimental se muestra en la tabla 2 a continuación:

*Tabla 2. Calendario de días de experimentación de proyecto.*

Nivel de refrigerante (%)	Campaña #1			Campaña #2			Campaña #3			Campaña #4		
	Día experimental	Temp mín (°C)	Temp max (°C)	Día experimental	Temp mín (°C)	Temp max (°C)	Día experimental	Temp mín (°C)	Temp max (°C)	Día experimental	Temp mín (°C)	Temp max (°C)
60	15-16/ago	33.13	45.91	25-26/ago	28.51	43.61	13-14/sep	23.39	40.08	24-25/sep	22.45	37.95
80	17-18/ago	32.63	46.23	27-28/ago	31.08	47.08	15-16/sep	25.71	39.5	26-27/sep	23.08	39.3
100	24-25/ago	29.22	41.59	29-30/ago	30.32	44.23	18-19/sep	23.8	36.93	28-29/sep	23.6	38.99

#### 4.5.2. Acopio y procesamiento de datos

A continuación, se muestran (Tabla 3) las herramientas para la recuperación y el procesamiento de los datos obtenidos en las campañas.

Tabla 3. Herramientas para recuperación y procesamiento de datos.

Proceso	Herramienta	Proveedor
Acopio	Software PC400 v4.7.0.4	Campbell Scietific
Procesamiento	Excel	Microsoft

Los datos almacenados por el datalogger CR3000 fueron extraídos por medio del software PC400 y descargados en una hoja de Excel para su posterior análisis.

#### 4.6. Carga y recuperación de gas refrigerante

Se evaluaron los efectos en el consumo de energía a diferentes niveles de carga de gas refrigerante. Para esta evaluación, es necesario el uso de equipos especializados, la instalación de válvulas de servicio y un procedimiento de carga para conseguir los niveles de carga de gas requeridos en las campañas de experimentación. Durante el primer día de campaña, se opera el equipo AC al 60% de su carga nominal. En el segundo día se recarga un 10% para alcanzar el 70%. Se repite el proceso hasta alcanzar la carga óptima (100%) según el fabricante.

##### 4.6.1. Equipos e instrumentos

Los equipos utilizados para los procesos de carga y recuperación se muestran en la Figura 10. Se utilizaron manómetros específicos para el refrigerante R410A (incluye mangueras de servicio) y una báscula para regular el peso exacto del gas refrigerante cargado y retirado del tanque con gas R410A. Para el proceso de recuperación de gas refrigerante se utilizaron tanques de recuperación específicos para el manejo de gas refrigerante R410A y un compresor.



Figura 10. Equipos representativos para proceso de carga y recuperación de gas refrigerante.

#### 4.6.2. Instalación de válvulas de servicio

La válvula de servicio se instaló en la línea de baja presión del equipo AC para la carga y recuperación del refrigerante (Fig. 11).



Figura 11. Válvula de servicio tipo perforadora.

### **4.6.3. Procedimiento de carga y recuperación de refrigerante**

Los procesos de carga y recuperación son dependientes en gran medida del tipo de equipo AC, los instrumentos de soporte (manómetros, válvulas de servicio, etc), el tipo de presentación de refrigerante según la marca utilizada y de la marca y modelo del instrumento de pesaje de refrigerante, entre otros. Se recomienda el uso de zapato cerrado para la manipulación del equipo, los instrumentos y el refrigerante. También se recomienda realizar todo el procedimiento (con excepción de los pasos en las secciones 4.6.3.5 y 4.6.3.7) en compañía y con apoyo de una segunda persona.

#### **4.6.3.1. Desconexión del Sistema:**

- Se apagó el equipo de aire acondicionado desde el botón de on/off y se desconectó la conexión a la corriente directamente desde el centro de carga.
- Se desconectó el equipo de la alimentación eléctrica y se retiró el sensor de medición de corriente y la sonda a la salida de aire del evaporador.
- Se retiró la carátula del equipo y se desconectó el control.
- Con apoyo (mínimo dos personas), se desinstaló el equipo del sitio de operación y se colocó sobre una superficie plana (Fig. 12).



*Figura 12. Equipo experimental posicionado sobre superficie plana elevada.*

#### **4.6.3.2. Descarga inicial del refrigerante:**

- Se conectó una de las mangueras del manómetro al puerto de la válvula de servicio en la línea de baja presión y la otra al tanque de recuperación.
- Se abrió la válvula de servicio y las del manifold para descargar todo el refrigerante en el tanque de recuperación.



*Figura 13. Tanque de recuperación y bomba de vacío.*

- Se esperó a que la carátula del manómetro indicara una presión menor a 0 psi y se cerraron las válvulas del manómetro y la de servicio.
- Al finalizar la descarga, se cerró solo la manguera del tanque de recuperación.

#### **4.6.3.3. Calibración de báscula:**

- Se posicionó la báscula en el suelo del sitio experimental, cerca del equipo AC.
- Se calibró el nivel por medio del sistema incluido en la báscula, el cual consiste de burbuja y círculo y se ajustó la altura de los soportes hasta que la burbuja se posicione en el centro del indicador.

- Se ajustó el valor inicial del peso en cero kilogramos pulsando el botón TARE en la báscula.
- Se posiciona el tanque con el puerto de salida apuntando sobre la báscula (de cabeza).
- Se conectó la manguera del manifold al tanque con refrigerante y se abrió la válvula del tanque.



*Figura 14. Tanque de suministro posicionado sobre la báscula y manguera de manifold conectada.*

- Se desconectó levemente desde el otro extremo (desde el lado de las carátulas del manifold) la manguera para provocar la purgar de aire alojado dentro de la manguera. Se recomienda cerrar rápidamente después de unos

segundos para evitar pérdidas mayores de refrigerante, minimizar el impacto ambiental y la exposición directa con el refrigerante.

- Se procedió a abrir completamente la válvula de la manguera conectada entre el tanque con refrigerante y el manifold.
- Se ajustó de nuevo a cero con el botón TARE en la báscula.

#### 4.6.3.4. Recarga del refrigerante:

- Se conectó el equipo de acondicionamiento de aire a la corriente eléctrica y conecte el cable del control (carátula) al equipo.



Figura 15. Reconexión de carátula de equipo AC, previo a la recarga de refrigerante.

- Se energizó el equipo y se ajustó la temperatura de set point al mínimo permitido ( $17^{\circ}\text{C}$  para este equipo experimental).
- Se abrió gradualmente la válvula de la manguera que conecta el manifold con el puerto de la válvula de servicio instalada en la línea de baja presión del equipo.
- Se monitoreó en la pantalla de la báscula la cantidad de refrigerante que ingresaba al sistema y se cerró la válvula al llegar al 60% (0.384kg de refrigerante R410A para este equipo experimental).



*Figura 16. Recarga del 60% (0.384 kg) de refrigerante R410A en campaña #1.*

- Terminada la recarga, se cerró la válvula del tanque de suministro y se abrió de nuevo la válvula de la manguera manifold-equipó.

- Para aprovechar al máximo el refrigerante y evitar emisiones adicionales, se elevó el tanque de suministro para provocar el desplazamiento de refrigerante residual en las mangueras y manifold. La válvula del tanque de suministro se cerró completamente después de unos minutos.
- Se registró la presión manométrica como referencia del nivel de refrigerante.



*Figura 17. Lectura de presión manométrica en línea de baja presión durante campaña #1.*

- Se cerró la válvula de servicio y se desconectaron las mangueras conectadas al tanque de suministro y al puerto de la válvula de servicio.
- Se apagó el equipo y se desconectó la conexión a la alimentación eléctrica.
- Se desconectó el cable del control (carátula) al equipo y se posicionó el equipo en su sitio de operación.

- Se conectó la carátula, y se posicionó el sensor de corriente en el cable de alimentación y la sonda de temperatura a la salida de aire del evaporador.
- Se conectó el equipo a la alimentación y se encendió desde el botón on/off.

#### **4.6.3.5. Ciclo de operación:**

- Para la estabilización de las condiciones dentro del sitio experimental, se operó el equipo a una temperatura de set point de 24°C en un tiempo de entre 30 a 60 minutos.
- Posterior al tiempo de estabilización, comienza el conteo de 24 horas de prueba.

#### **4.6.3.6. Repetición de ciclos:**

- Después de 24 horas, se apagó el equipo y se desconectó de la fuente de alimentación.
- Se repitieron los pasos descritos en las secciones 4.5.3.3 y 4.5.3.4 recargando solo 10% de refrigerante (0.064 kg para este equipo experimental).



*Figura 18. Recarga parcial de 10% de refrigerante en campaña #1.*

- Como se describe en la sección 4.5.3.5, se operó el equipo con el 10% de refrigerante adicional.
- Se repitieron los tres pasos anteriores hasta alcanzar la recarga y operación con el 100% de refrigerante (0,640 kg total especificado por el fabricante).

#### **4.6.3.7. Mediciones continuas:**

- Debido a la manipulación del sensor de corriente y la sonda de temperatura de evaporación, durante cada ciclo se comprobó que las lecturas de corriente y temperatura en los puntos clave del sistema estaban siendo registradas correctamente por el datalogger.

#### 4.7. Cálculos de TEWI

De acuerdo con el Instituto Australiano de Refrigeración, Aire acondicionado y Calefacción (AIRAH por sus siglas en inglés) [55], el cálculo de TEWI (Total Equivalent Warming Impact) se realiza con la siguiente ecuación:

$$\text{TEWI} = \text{Impacto Directo} + \text{Impacto Indirecto} \quad (1)$$

$$\text{Impacto Directo} = (\text{GWP} \cdot m \cdot L_{\text{anual}} \cdot n) + [\text{GWP} \cdot m \cdot (1 - \alpha_{\text{recuperación}})] \quad (2)$$

$$\text{Impacto Indirecto} = (E_{\text{anual}} \cdot n \cdot \beta) \quad (3)$$

Donde:

GWP = Potencial de calentamiento atmosférico (kgCO<sub>2</sub>/kg)

m = Carga de refrigerante (kg)

$L_{\text{anual}}$  = Tasa de fuga (%/año)

n = Tiempo de vida del sistema (años)

$\alpha_{\text{recuperación}}$  = Factor de recuperación (0-1)

$E_{\text{anual}}$  = Consumo de energía por año (kWh/año)

$\beta$  = Factor de emisión indirecta (kgCO<sub>2</sub>/kWh)

Para equipos AC de ventana se recomienda utilizar tasa de fuga anual del 2% y tiempo de vida de una década (n = 10). Para los cálculos finales se asume un factor de recuperación igual a 1, lo que significa que no se recupera refrigerante al final de la vida útil del equipo y  $[\text{GWP} \cdot m \cdot (1 - \alpha_{\text{recuperación}})] = 0$ .

Para obtener el impacto ambiental de la temporada de verano se modifica el indicador de TEWI, al cual se denominará SEWI (Seasonal Equivalent Warming Impact), con el que se obtiene el impacto equivalente y se simula la emisión de refrigerante por fuga solo para los días propuestos para la estación de verano.

$$\text{SEWI} = \text{Impacto Directo de temporada} + \text{Impacto Indirecto de temporada} \quad (4)$$

#### 4.7.1. Impacto Directo

Para el término de impacto ambiental debido a fugas se utilizó el potencial de calentamiento atmosférico (GWP por sus siglas en inglés) para el gas refrigerante R410A proporcionado por el IPCC en su sexto reporte y la ecuación para el cálculo de impacto directo se utilizará como se muestra a continuación:

$$\text{Impacto Directo de temporada} = \left( \text{GWP} \cdot m \cdot L_{x\%} \cdot \frac{d}{365} \right) \quad (5)$$

Los niveles de fuga de gas estarán basados en las cantidades propuestas para la experimentación.

#### 4.7.2. Impacto Indirecto

El Impacto Indirecto se calculó utilizando los datos de consumo de energía obtenidos en la campaña experimental y el factor de conversión proporcionado por el Registro Nacional de Emisiones [56].

$$\text{Impacto Indirecto de temporada} = (E_{día_{x\%}} \cdot \beta \cdot d) \quad (6)$$

Debe tenerse en cuenta que el factor de emisión es el más actualizado proporcionado por el Registro Nacional de Emisiones.

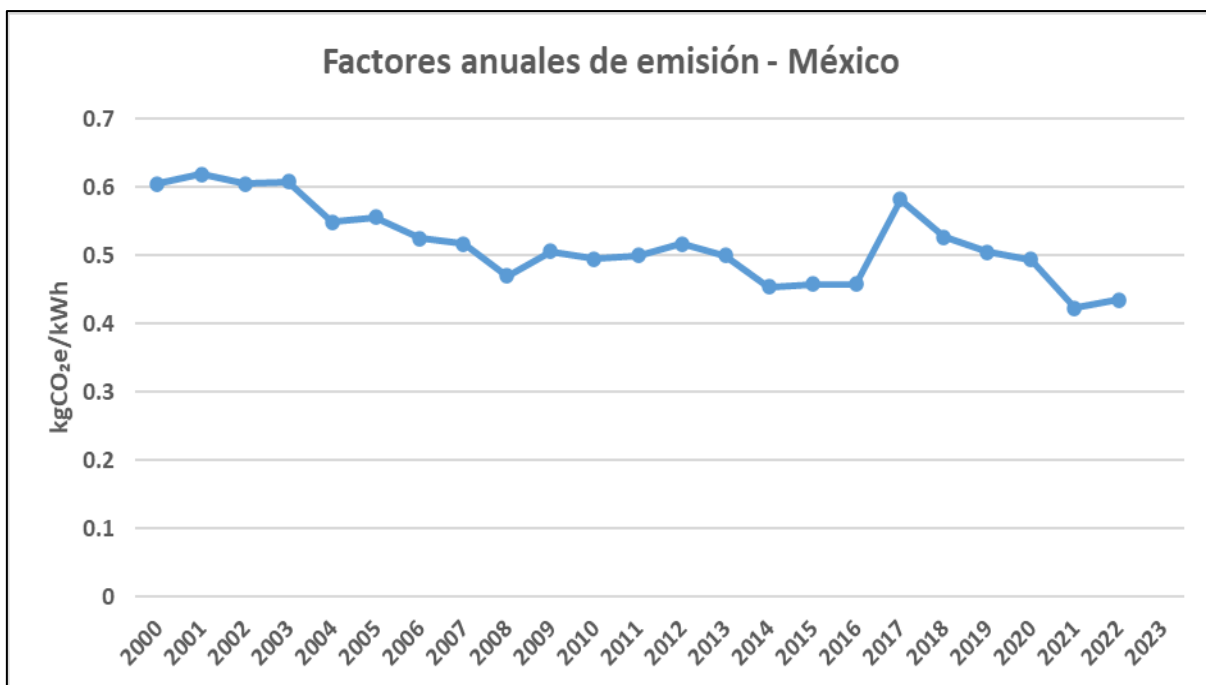


Figura 19. Factores de emisión para el cálculo de emisiones indirectas 2000-2023.

Como se observa en la variación anual, este factor de emisión tiene se reduce debido a la continua integración de energías renovables en los procesos de producción de energía.

#### 4.8. Temperatura de días típicos de temporada de verano

Del análisis de los datos de temperatura de la zona, acopiados de la estación Davis del Instituto de Ingeniería, se obtuvieron las temperaturas horarias para los meses de junio a septiembre (Fig. 20).

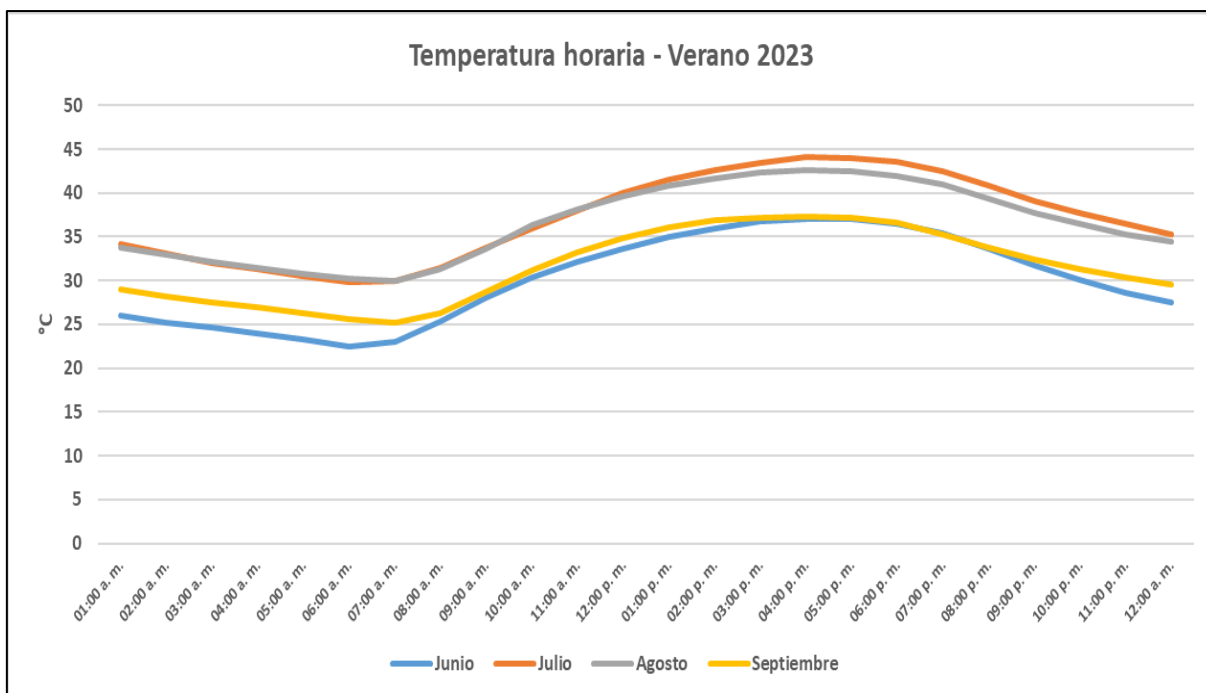
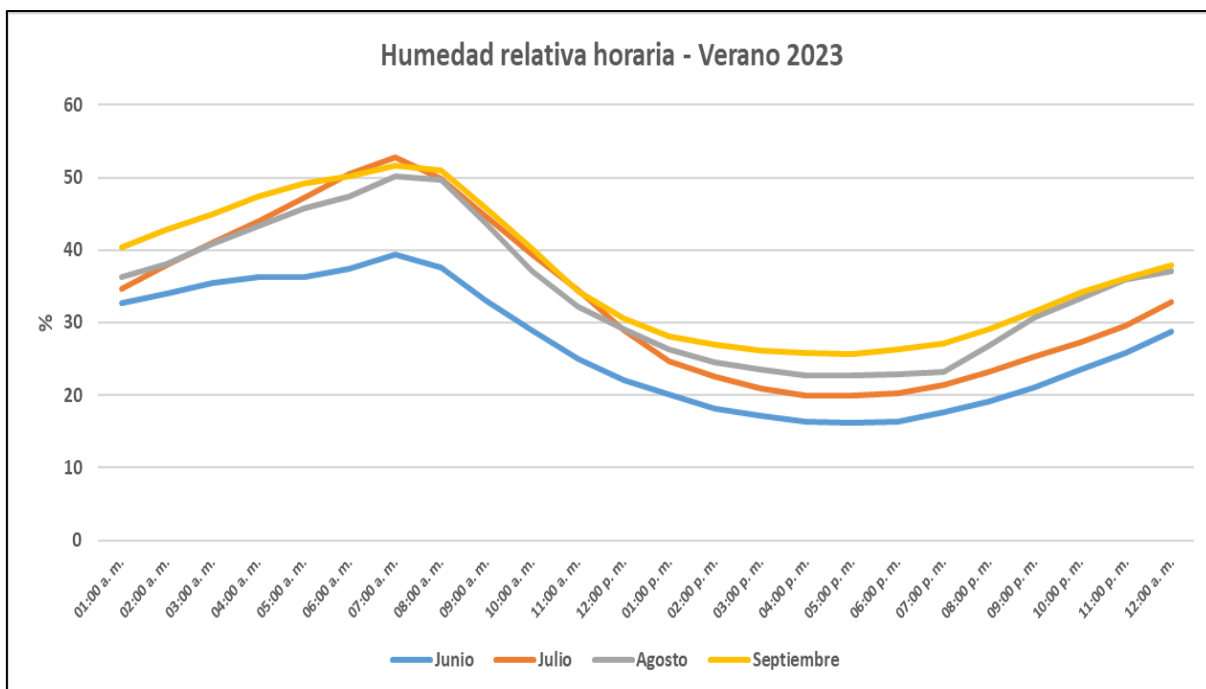


Figura 20. Temperaturas horarias para un día típico de los meses de verano en Mexicali, B.C.

Como muestran los datos, el comportamiento de la temperatura horaria para un día típico es similar para los meses de junio y septiembre. La diferencia entre sus valores mínimos y máximos es de 2.66°C y 0.30°C respectivamente. De igual manera, los meses de julio y agosto tienen un comportamiento similar con diferencias mínimas y máximas de 0.13°C y 1.42°C respectivamente.

#### 4.8.1. Humedad relativa

En comparación con las temperaturas de los días típicos, la humedad relativa (Figura 21) presenta similitudes en los meses de julio a septiembre, alcanzando máximos de 50 % a 53 % entre las 6am y 8am. Por otro lado, el día típico del mes de junio se presenta con bajo porcentaje de humedad relativa, alcanzando máximos de 40 % y mínimos de 16 %.



*Figura 21. Humedad relativa horaria para un día típico de los meses de verano en Mexicali, B.C.*

Se observa entonces una variabilidad en la humedad relativa típica de los meses cálidos considerados en este estudio. Sin embargo, para el alcance de esta investigación se utilizarán solo las temperaturas para calcular los resultados de consumo eléctrico, ya que éstas son las más influyentes.

## **CAPÍTULO V - RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Como datos principales de la experimentación se obtuvo el consumo eléctrico horario del equipo AC en operación con diferentes niveles de refrigerante y la correspondiente temperatura a la entrada del condensador. Para fines experimentales, esta temperatura se establece como la temperatura del aire circundante o temperatura ambiente y se utiliza para obtener las relaciones horarias de consumo-temperatura que se mostrarán en las siguientes secciones de resultados (5.1 y 5.2). En la sección 5.5 se obtienen los consumos eléctricos dependientes de las temperaturas horarias de un día representativo para cada mes de verano y observar las diferencias entre los meses cálidos en los que se realizaron campañas experimentales (agosto y septiembre) y en los que no se realizaron campañas experimentales. Posteriormente se utilizan los datos de temperatura y consumo eléctrico de las campañas experimentales para obtener ecuaciones de regresión lineal y aplicarlo a todos los días de la temporada cálida considerados en esta investigación. En la sección 5.6 se utilizan los resultados de consumo diario representativo de la sección 5.5 para obtener un aproximado de las emisiones equivalentes de la temporada de verano.

### **5.1. Campañas experimentales - agosto**

En el mes de agosto se realizaron las primeras dos campañas experimentales llamadas en esta investigación campaña #1 y campaña #2. La primera campaña comenzó el día 15 de agosto y finalizó el día 25 de agosto. La primera campaña fue interrumpida por la tormenta tropical Hillary. La pausa duró del 18 de agosto hasta el 22, reanudando el experimento el día 23. La segunda campaña inició el día 25 y finalizó el 30, sin ningún contratiempo.

### 5.1.1. Campaña #1

La campaña experimental #1 realizada a mediados del mes de agosto nos proporcionó los datos de consumo eléctrico y temperaturas exteriores mostrados en la siguiente figura:

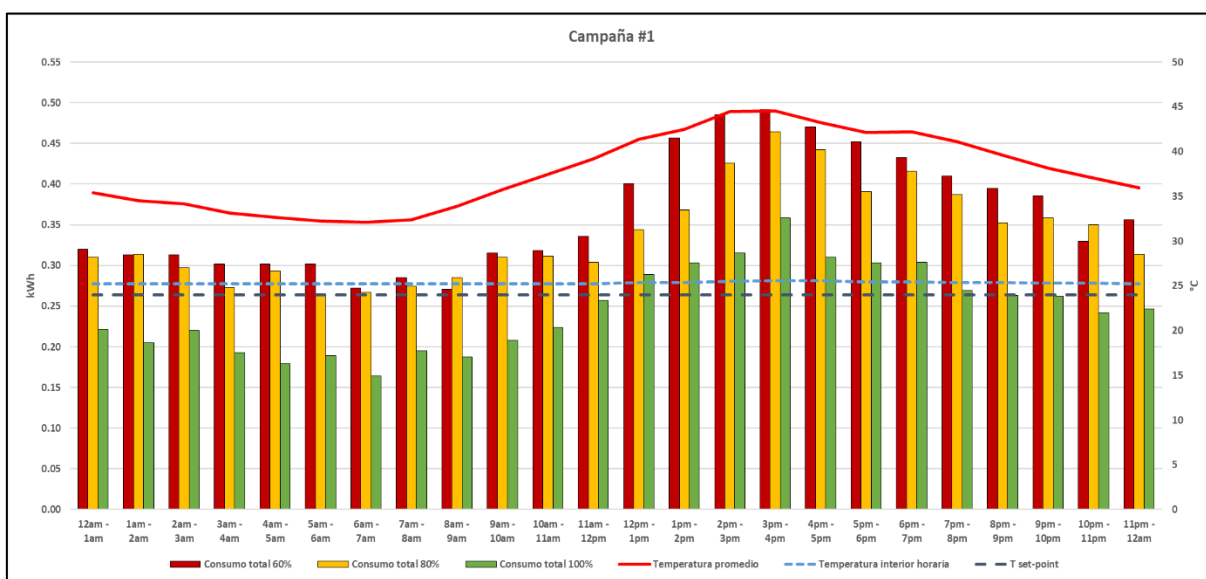


Figura 22. Resultados horarios de campaña experimental #1.

En los resultados de esta campaña tuvieron el comportamiento de consumo eléctrico esperado. En general, los datos de consumo horario con el 60% de refrigerante son superiores a los consumos en operación al 80 y 100%. Solo se observa comportamiento atípico en el consumo eléctrico al 80% en los horarios de 8am-9am y 10pm-11pm, posiblemente debido a cambios en la humedad relativa en el día experimental con el 80% de refrigerante. Se observa también que la variación de la temperatura exterior horaria condiciona el comportamiento para todos los datos horarios de consumo.

### 5.1.2. Campaña #2

La campaña experimental #2 fue realizada en la última semana del mes de agosto proporcionó los siguientes datos de consumo eléctrico y temperaturas exteriores:

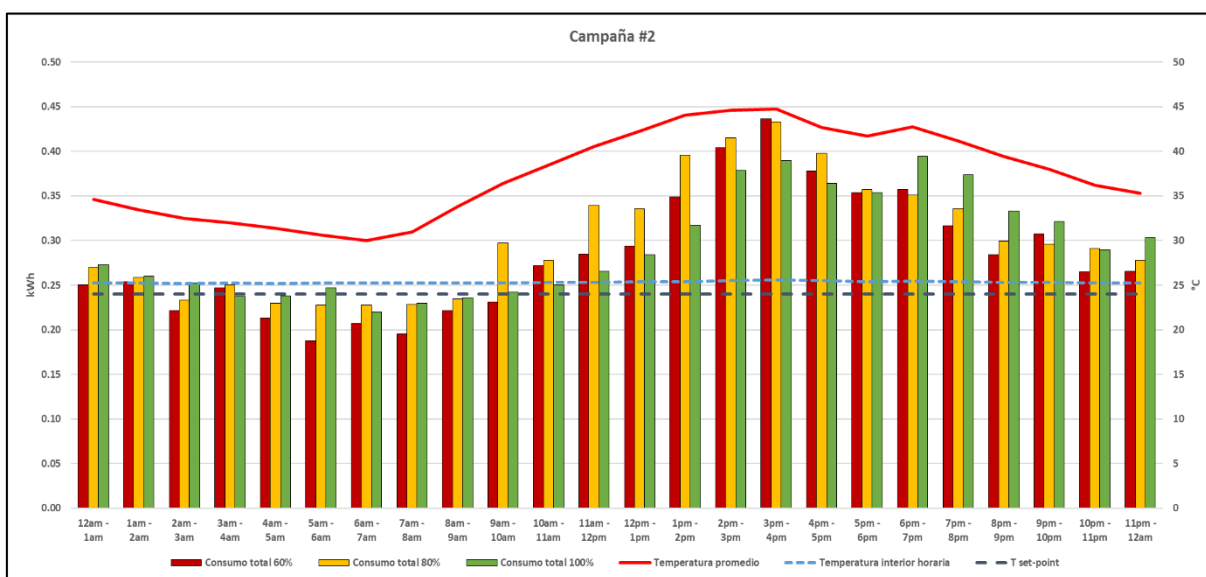


Figura 23. Resultados horarios de campaña experimental #2.

En comparación con la campaña #1, es posible observar una inversión en el comportamiento esperado, específicamente en las horas nocturnas y de madrugada. Esto significa que el consumo eléctrico con bajos niveles de refrigerante (60%) fue generalmente menor que los consumos con el nivel medio (80%) y óptimo (100%). Por otra parte, en algunas horas de temperatura ambiente altas, el consumo con niveles inferiores a lo óptimo fue mayor. Esto podría deberse a los efectos remanentes en la atmósfera urbana remanentes de la tormenta tropical Hillary debido a que el día experimental con 60% de refrigerante en la campaña #2 se realizó justo después de

terminar la campaña #1. También se observa que por la mañana y a medio día el consumo eléctrico con el 80% de refrigerante fue mayor que los consumo al 60 y 100%.

### 5.1.3. Promedio de campaña - agosto

Se promedian a continuación los consumos horarios de las campañas #1 y #2.

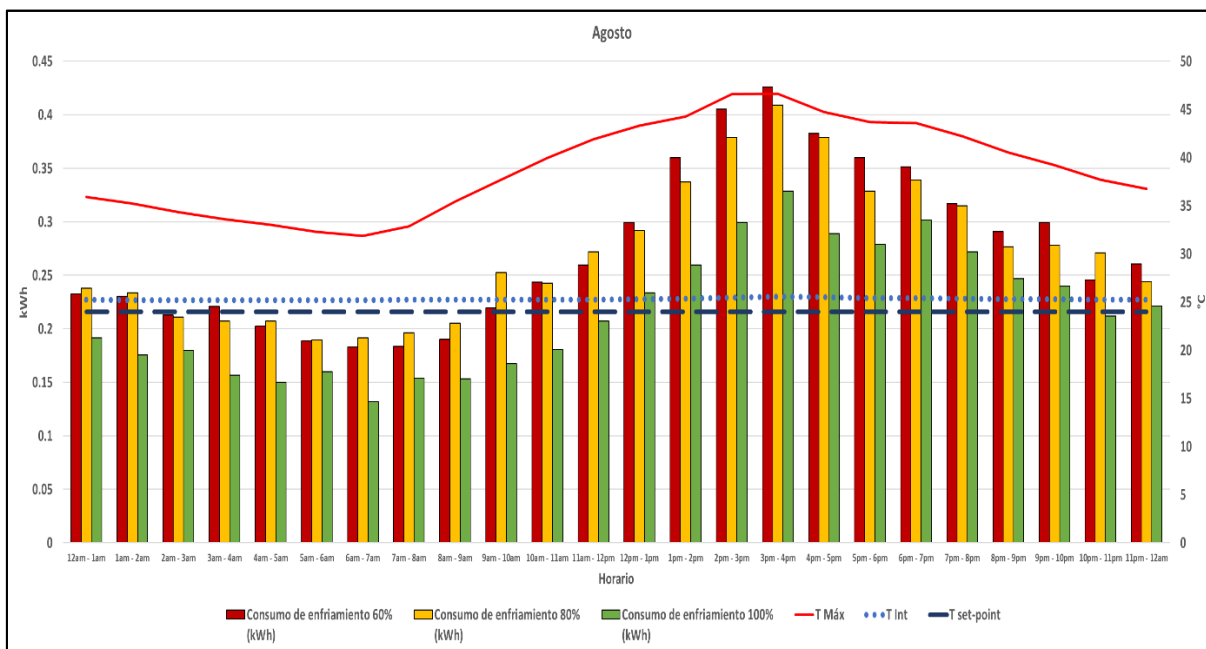


Figura 24. Consumo eléctrico horario promediado de las campañas experimentales del mes de agosto.

Se observa que, al promediar los resultados de consumo eléctrico, los horarios de mayor temperatura toman el comportamiento escalonado esperado desde las 11 am hasta las 10 pm. Por la madrugada el consumo con 80% de refrigerante supera al consumo eléctrico horario con 60%. La humedad relativa y los cambios de velocidad del viento podrían ser factores potenciales de este cambio en el comportamiento esperado. Para explicar más a fondo esta variabilidad se necesita extender la investigación más allá del alcance de este estudio.

#### 5.1.4. Temperatura interior en condiciones extremas

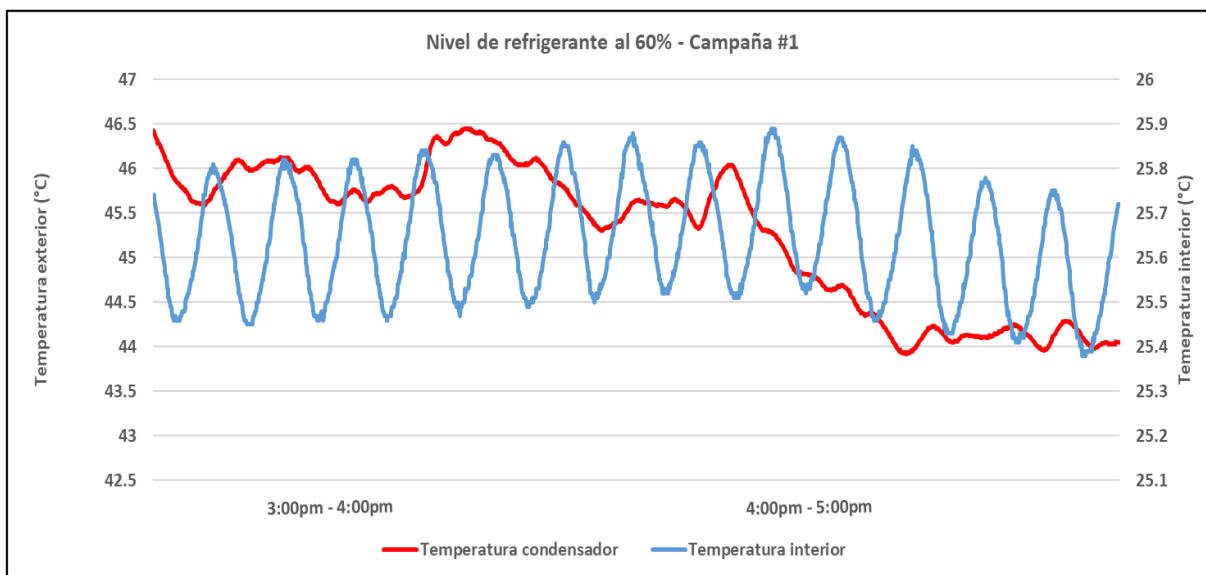
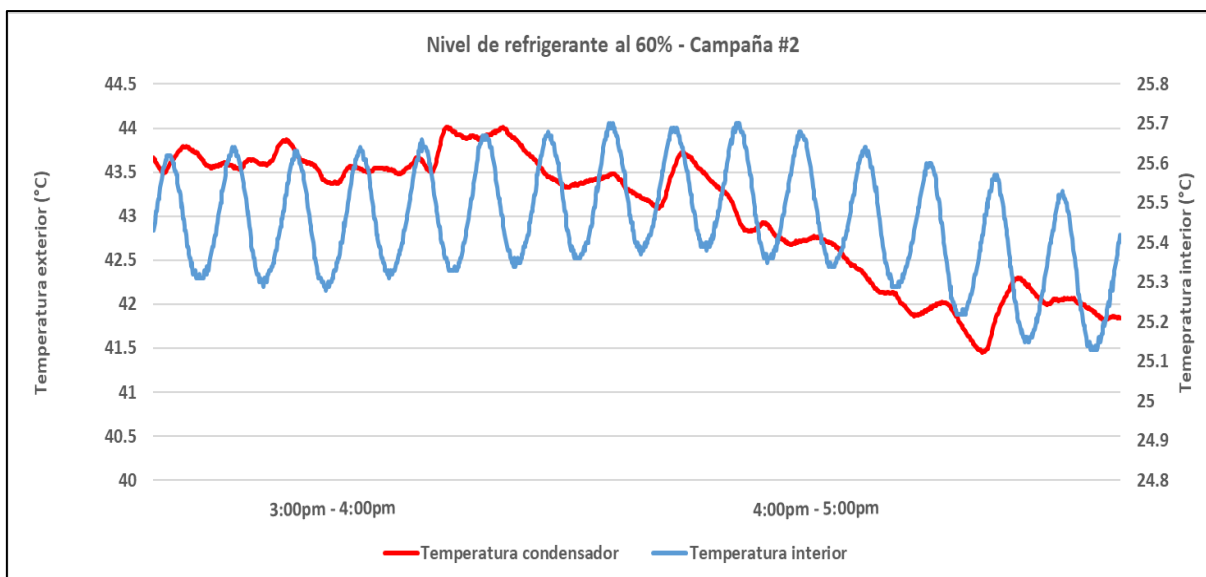


Figura 25. Temperatura interior bajo condiciones extremas en campaña #1.

La figura 25 muestra graficados los datos registrados cada cinco segundos por las sondas de temperatura para observar la variación de la temperatura exterior en comparación con la variación de la temperatura al centro del sitio experimental. Los datos corresponden al día experimental al 60% de refrigerante de la campaña #1 en el horario de 3:00pm a 5:00pm, en el que se registraron las temperaturas horarias superiores (entre 44.5°C y 46.0°C). Se observa que, bajo condiciones de alta temperatura y bajo nivel de refrigerante, la temperatura del interior del cuarto se mantiene entre 25.3°C y 25.9°C.



*Figura 26. Temperatura interior bajo condiciones extremas en campaña #2.*

De igual forma, se observan en la figura 26, donde se muestran graficados los datos registrados cada cinco segundos correspondientes al día experimental al 60% de refrigerante de la campaña #2 en el horario de 3:00pm a 5:00pm. En este lapso de tiempo del día experimental, la temperatura del interior del cuarto se mantuvo entre 25.3°C y 25.9°C en condiciones de alta temperatura exterior y bajo nivel de refrigerante.

Definiendo como condiciones extremas de operación las mostradas en las figuras 25 y 26, es posible deducir que el usuario tiene pocas posibilidades de detectar la falla (fuga de refrigerante) que provoca excedente energético ya que, las temperaturas al interior se mantuvieron muy cercanas al set-point especificado en el termostato, lo que permitió mantener condiciones de confort.

## 5.2. Campañas experimentales - septiembre

En el mes de septiembre se realizaron las últimas dos campañas nombradas campaña #3 y #4. La campaña #3 inició el día 13 y finalizó el 19 de septiembre. La campaña #4 inició el día 24 y finalizó el día 29. En el mes de septiembre no se presentaron condiciones atípicas (e.g. tormenta tropical Hillary en el mes de agosto) y dominaron los cielos despejados y altas temperaturas entre las 12pm y 5pm.

### 5.2.1. Campaña #3

La campaña experimental #3 realizada a mediados del mes de septiembre proporcionó datos de consumo eléctrico y temperaturas exteriores como se muestran a continuación:

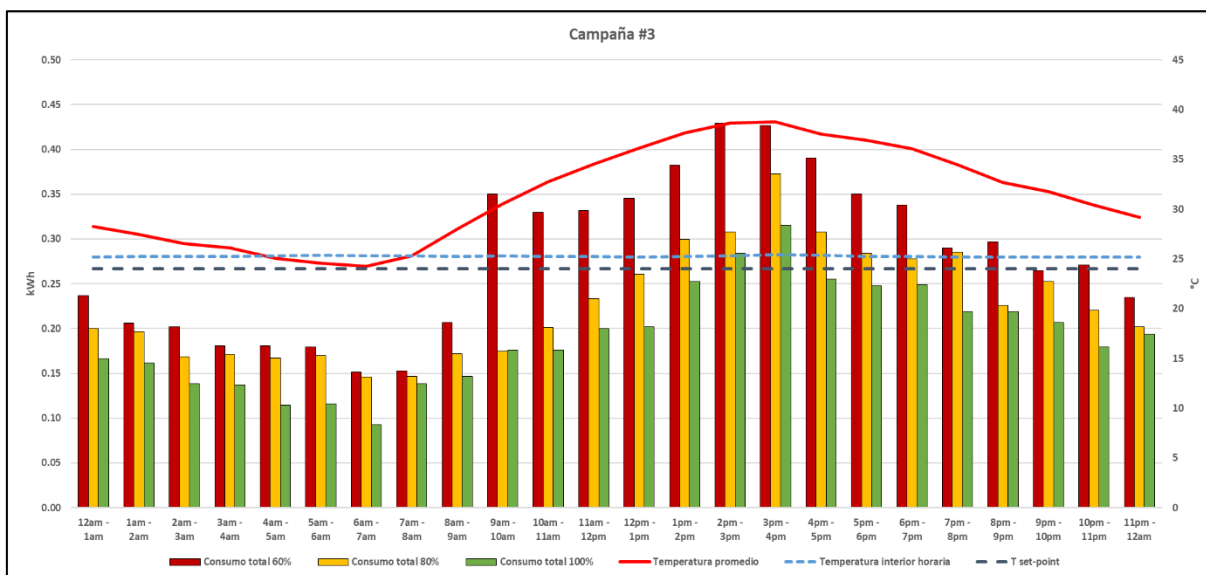


Figura 27. Resultados horarios de campaña experimental #3.

En esta campaña, los consumos eléctricos a los diferentes niveles de refrigerante tienen un comportamiento escalonado definido. Esto significa que en la mayoría de los datos horarios se encuentra que los consumos eléctricos a menor nivel

de refrigerante son mayores que los consumos al 90% y 100%. Los datos de consumo entre las 9am y las 7pm para el día experimental en operación al 60% de refrigerante son marcadamente altos en comparación con los consumos en operación con niveles de refrigerante mayores. Esto podría ser un posible indicador de la presencia de una ola de calor.

### 5.2.2. Campaña #4

La campaña experimental #4 realizada en la última semana del mes de septiembre proporcionó los siguientes datos de consumo eléctrico y temperaturas exteriores:

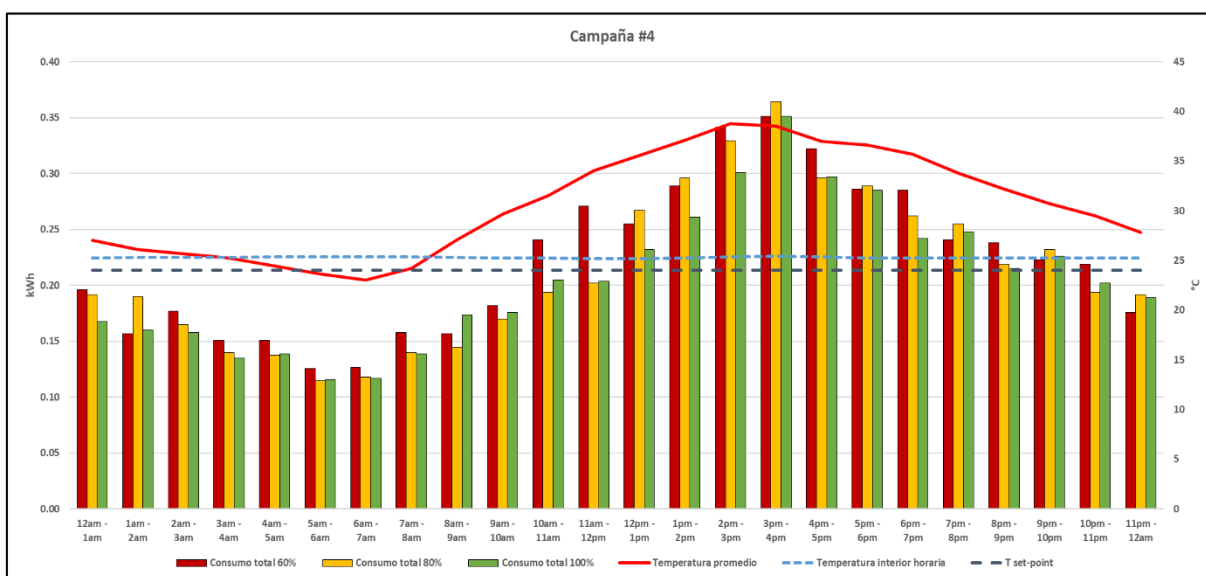


Figura 28. Resultados horarios de campaña experimental #4.

En comparación con la campaña #3, no se presenta un consumo eléctrico marcadamente alto durante la mayor parte del día por parte del día al 60% de refrigerante. Por otro lado, aunque es notable la diferencia entre los consumos eléctricos entre la operación con el menor (60%) y el mayor nivel de refrigerante

(100%), el 25% de las lecturas de consumo con el 80% de refrigerante supera los consumos al 60 y 100%.

### 5.2.3. Promedio de campaña – septiembre

En la figura 29 se promedian a continuación los consumos horarios de las campañas #3 y #4.

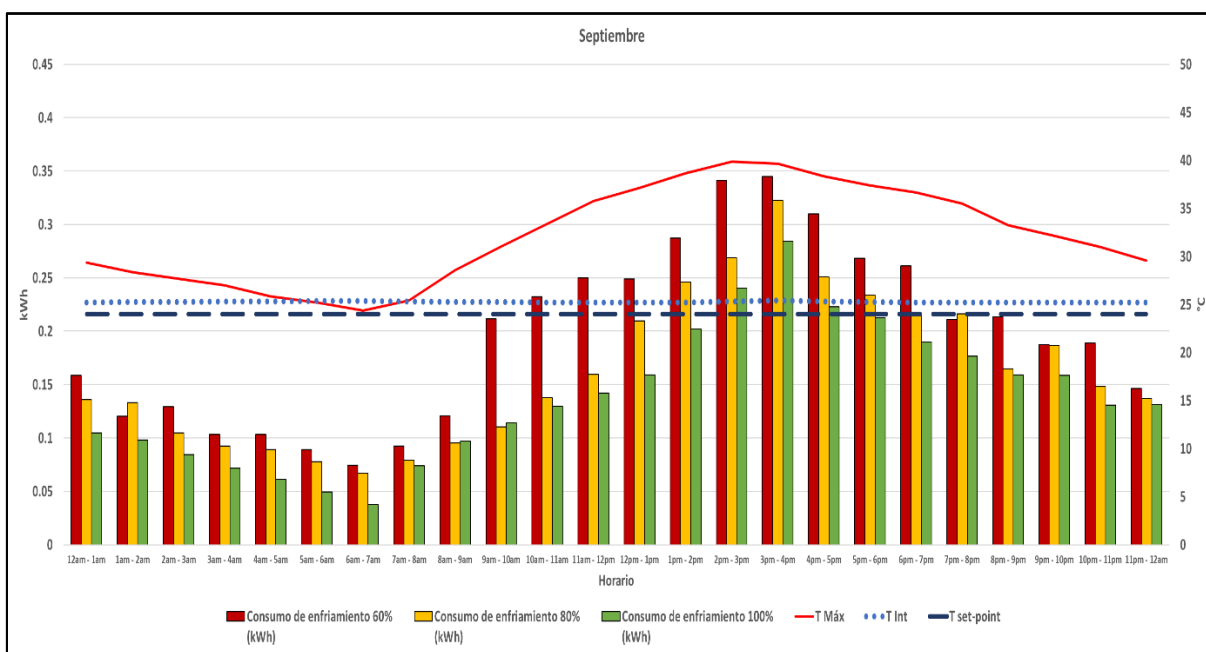


Figura 29. Consumo eléctrico horario promediado de las campañas experimentales del mes de septiembre.

Los resultados promediados de las campañas de septiembre muestran una reducción en el consumo eléctrico horario en operación a todos los niveles de refrigerante. Comparando los consumos eléctricos de septiembre con los de agosto, se observa la fuerte relación entre el consumo eléctrico y las temperaturas exteriores. A diferencia de los resultados mensuales de agosto, para el mes de septiembre se

observa que el comportamiento escalonado esperado se presenta durante la mayor parte del día representativo.

### 5.3. Lecturas de presión posteriores a las recargas de refrigerante

A medida que se agrega refrigerante al sistema, la cantidad total de masa de refrigerante aumenta, lo que resulta en una mayor densidad de refrigerante en el sistema. Esto a su vez aumenta la presión en el lado de baja presión, ya que hay más moléculas de refrigerante presentes en el sistema que ejercen presión sobre las paredes internas de los tubos en el evaporador.

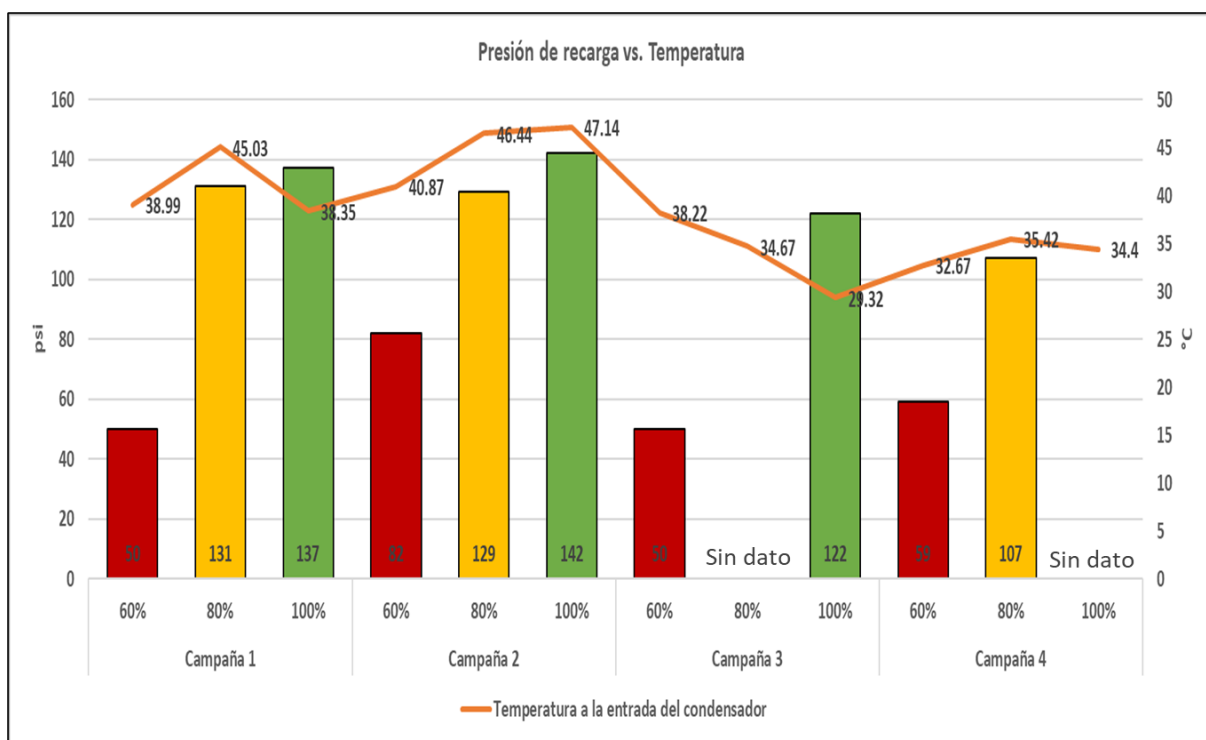


Figura 30. Lecturas de presión manométrica posterior a los procesos de recarga de refrigerante.

En la Figura 30 se muestra que la presión posterior a recargar 60% de refrigerante es significativamente menor en comparación con las presiones al 80% y 100%. Esto se debe a que el sistema no está completamente cargado, lo que significa que hay menos refrigerante para vaporizarse en el evaporador y mantener una presión adecuada en ese lado del sistema. Con 80% de refrigerante la presión es cercana a la óptima con 100% de refrigerante ya que se ha agregado más refrigerante al sistema. Con 100% de refrigerante (0.640 kg de acuerdo con lo especificado por el fabricante) la presión se encuentra en su rango óptimo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que las lecturas de presión también pueden variar según las condiciones ambientales.

En Mexicali, donde las temperaturas pueden ser extremadamente altas durante el verano, las lecturas de presión pueden verse influenciadas significativamente. A mayor temperatura, el refrigerante tiende a evaporarse más fácilmente en el evaporador, lo que puede resultar en lecturas de presión más altas en el lado de baja presión. Por lo tanto, las lecturas de presión tomadas en Mexicali pueden ser más altas en comparación con áreas con temperaturas más moderadas. Esto se observa al comparar las lecturas de presión de las campañas 1 y 2 realizadas en el mes de agosto, con las lecturas de las campañas 3 y 4 realizadas en el mes de septiembre.

#### **5.4. Análisis de tiempos de enfriamiento**

Se espera que, al operar a plena carga, el sistema tenga una mayor capacidad para retirar calor del espacio, por lo tanto, el compresor complete el ciclo de

enfriamiento en menor tiempo. Por otro lado, en un escenario en el que se opera el equipo con 60% de refrigerante, los tiempos de encendido del compresor son mayores debido a la baja capacidad de enfriamiento del sistema.

Para analizar estos supuestos, en la tabla 4 se muestran los tiempos de enfriamiento del compresor de los días experimentales en operación al 60 %, 80 % y 100 %, en las campañas 1 a 4.

*Tabla 4. Conteo de encendidos totales respectivos a cada día y campaña experimental.*

Campaña experimental	Nivel de refrigerante		
	60%	80%	100%
<b>1</b>	8.13	7.44	4.89
<b>2</b>	5.91	6.45	6.21
<b>3</b>	5.83	4.35	3.36
<b>4</b>	4.20	3.95	3.76
<b>Total</b>	24.08	22.19	18.23

Los resultados de las campañas 1, 3 y 4 muestran comportamientos esperados. Para el caso de la campaña experimental # 2, una posible explicación de que los periodos de encendido del compresor sean un poco mayores a mayor carga de refrigerante, podría deberse a la variabilidad de las condiciones del microclima en la zona de operación del equipo AC. Esto justifica la necesidad de analizar no solo las temperaturas del aire a la entrada del compresor sino incluir variables como humedad relativa y radiación solar.

### **5.5. Resultados de temporada junio - septiembre**

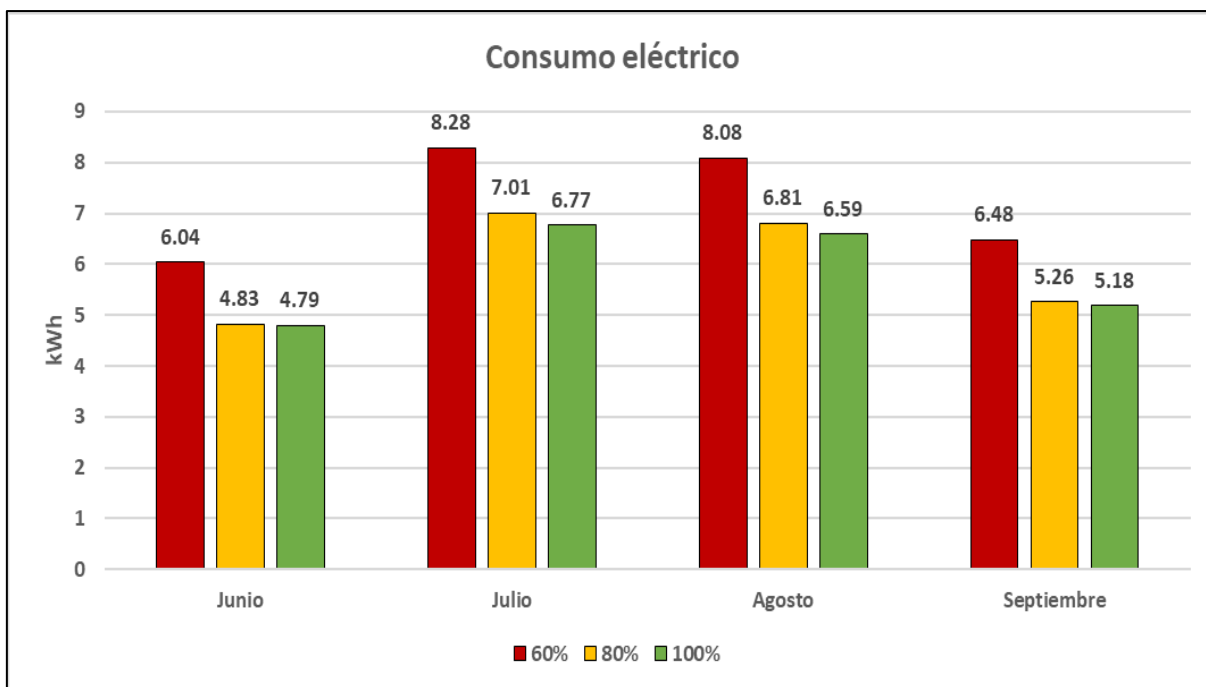
Posteriormente, utilizando los 96 datos de consumo eléctrico horario de cada uno de los diferentes niveles de carga de refrigerante, se elaboraron ecuaciones de

regresión lineal para el posterior análisis de todos los días promedio de la temporada (meses de junio a septiembre) mostrados en la figura 20. Las ecuaciones y datos relevantes se muestran en la tabla 5 donde la variable de dependiente representa el consumo eléctrico horario y la variable independiente corresponde a la temperatura promedio horaria.

*Tabla 5. Resultados de análisis de datasets para diferentes niveles de refrigerante.*

Nivel de refrigerante (%)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Ecuación	R <sup>2</sup>	valor p	RSE
60	22.45	45.90	$y_{60\%} = 0.01338x - 0.172546$	0.849	2.20E-16	0.03459
80	23.08	47.08	$y_{80\%} = 0.013026x - 0.190863$	0.8932	2.20E-16	0.02673
100	23.60	44.23	$y_{100\%} = 0.0117869x - 0.1562628$	0.89	2.20E-16	0.02307

Aplicando los modelos a los datos horarios de los días típicos de los meses de verano y se obtiene un total de consumo eléctrico en 24 horas de operación del equipo AC. Es importante mencionar que en estos consumos ya están considerados los tiempos de encendido del compresor y los tiempos en que está apagado. Los resultados se muestran en la figura 31.



*Figura 31. Consumo eléctrico en operación a diferentes niveles de refrigerante para días típicos de meses de verano 2023.*

Se obtienen dos observaciones aplicables a todos los meses. La primera es que, al comparar contra el consumo eléctrico en operación con 100% de refrigerante en el sistema, el excedente de consumo eléctrico en operación con 60% es de entre 22.42% y 26.09%. Comparado con el excedente en operación con 80%, que es de 0.79% a 3.53%, el impacto económico, energético y ambiental es considerablemente superior cuando se opera el equipo AC con un 40% menos de refrigerante en el sistema. La segunda observación se encuentra en variación entre el consumo eléctrico en operación con 80 y 100% de refrigerante. Para los meses más cálidos de julio y agosto, con temperaturas medias de 37.14°C y 36.51°C respectivamente, el excedente de consumo con 80% de refrigerante es notable y representa un 3.35 a 3.51%. En comparación con los meses menos cálidos de junio y septiembre, con temperaturas medias de 30.15°C y 31.55°C respectivamente, el excedente de consumo con 80% de

refrigerante se encuentra entre 0.79% y 1.51%. Esto podría indicar que, a temperaturas superiores a las de diseño, el impacto en el excedente energético debido a la falta de refrigerante es significativo en comparación con la operación en temperaturas inferiores a las de diseño. En ambos casos, pudiera pasar desapercibido que el equipo esté funcionando con una deficiencia del 20% de carga de refrigerante, lo cual puede generar más consumo eléctrico y más gasto si se tratara de más equipos con más capacidad de enfriamiento.

### 5.6. Impacto ambiental equivalente

Utilizando los datos de consumo eléctrico diario para los diferentes meses y niveles de refrigerante, se muestran en la figura 32 las emisiones totales equivalentes de temporada por medio de las ecuaciones 4, 5 y 6 mostradas en la sección 4.6.

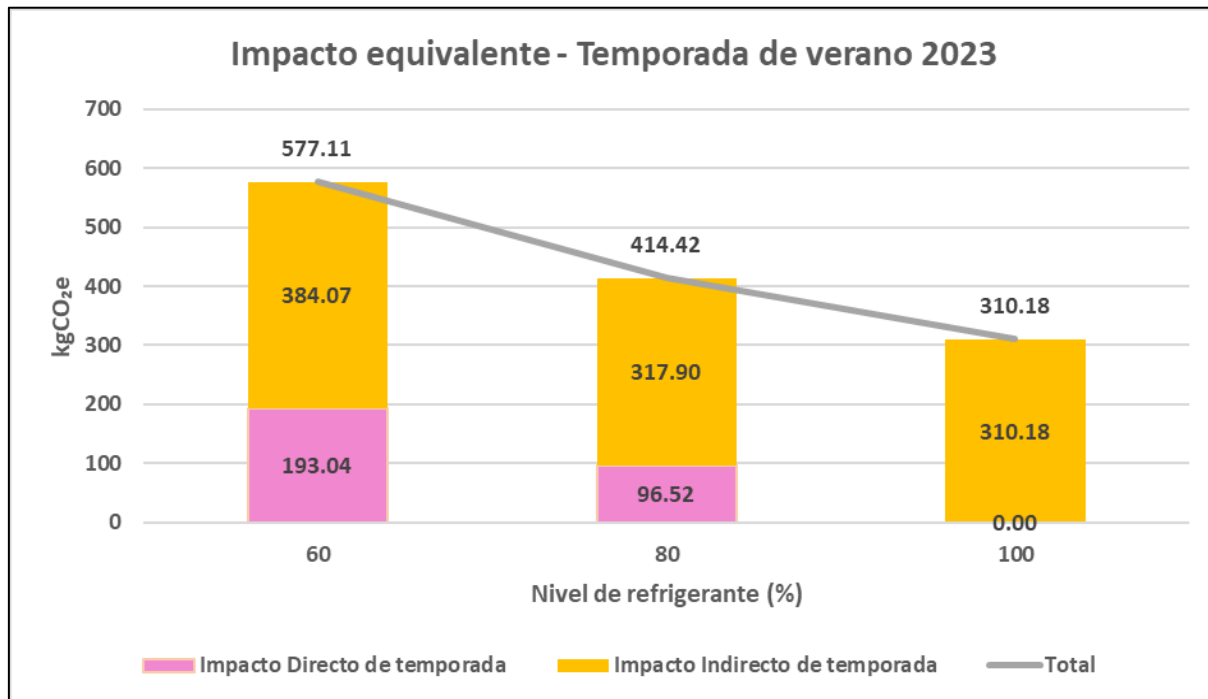
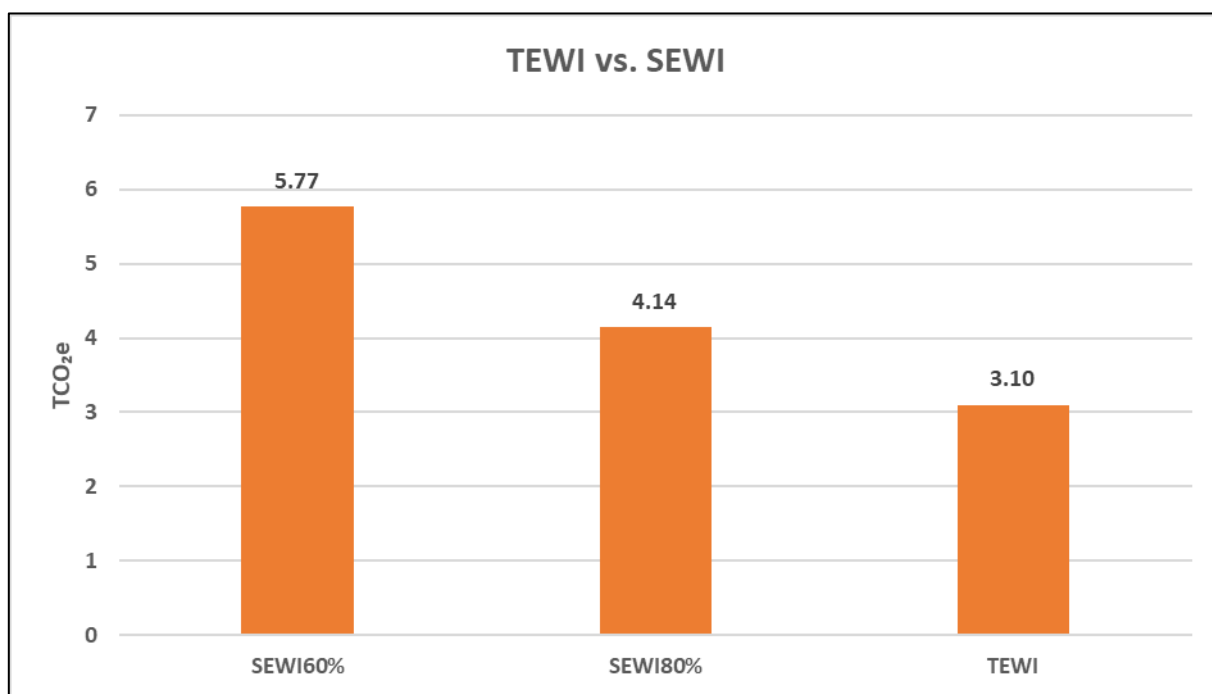


Figura 32. Impacto total equivalente de temporada de verano 2023.

Estos resultados de emisiones muestran un excedente de casi 100 kg de CO<sub>2</sub>e solo por la operación con el 80% del refrigerante en comparación con la operación al 100% y hasta de 267 kg de CO<sub>2</sub>e por la operación con 60%. El impacto directo debido a la fuga de refrigerante hacia el ambiente equivaldría al 23% y 33% del total de las emisiones por operación con 80% y 60% de refrigerante, lo que resalta la importancia de los mantenimientos preventivos al inicio de la temporada cálida.

Por último, se calcula TEWI con las recomendaciones de AIRAH (explicado en el capítulo III) utilizando el consumo anual con el 100% de refrigerante y se compara contra el SEWI de 60% y 80% en tiempo de vida de 10 años.



*Figura 33. Comparación de emisiones totales utilizando metodología convencional y propuesta.*

Se observa en la figura 33 cómo la metodología convencional para el cálculo de emisiones totales TEWI puede subestimar en 1.04 (4.14-3.10) y 2.67 (5.77-3.10)

toneladas de CO<sub>2</sub>e. Estos resultados derivan de considerar un tiempo de vida útil del equipo de 10 años, las emisiones directas por fugas anuales del 20 y 40 % respectivamente de la carga de refrigerante y la emisión resultante de consumo eléctrico adicional por funcionar con menos porcentaje de la carga de refrigerante y por ende los tiempos de enfriamiento son más prolongados. Este resultado se obtiene de datos experimentales de un solo equipo. La subestimación en una ciudad completa, con clima cálido extremo en verano, puede ser muy significativa.

## CAPÍTULO VI - CONCLUSIONES

Los resultados muestran cómo los factores de temperatura exterior y nivel de refrigerante condicionan en gran medida el consumo eléctrico de un equipo de aire acondicionado.

A diferencia de estudios realizados con simuladores o en cuartos de calorimetría bajo condiciones controladas, las condiciones ambientales reales en que este estudio se llevó a cabo, provocaron una considerable variabilidad en el consumo eléctrico y en las emisiones de gases de efecto invernadero.

La anterior investigación responde positivamente la hipótesis al demostrar que los métodos convencionales de cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero de equipos AC (TEWI) subestiman el impacto del excedente energético debido a la operación en ambiente de altas temperaturas y los bajos niveles de carga de refrigerante como resultado de fugas de refrigerante que eventualmente suceden en la temporada cálida (SEWI).

Adicionalmente, se observó que, para todos los días experimentales, incluso los realizados a temperaturas exteriores máximas extremas y el menor nivel de carga de refrigerante, la temperatura interior de confort se mantuvo estable entre 25 y 26°C. Lo que implica que, si una persona hubiera estado al interior del cuarto de experimentación, nunca se hubiera alertado de un mal funcionamiento o deficiencia de refrigerante, por lo que es posible que no se realice el mantenimiento necesario al equipo AC hasta que el sistema pierda completamente el gas refrigerante o presente fallo crítico.

Al comparar la operación del sistema con 100%, 80% y 60% de refrigerante, en los tres casos se alcanzó la temperatura del set-point y, por lo tanto, la condición de confort en el interior de la habitación por lo que el usuario no percibe la falta de refrigerante. Sin embargo, con respecto a la operación del sistema con carga total de refrigerante, se tuvo un consumo eléctrico extra de 3% cuando la cantidad de gas fue del 80% durante julio y agosto, y un significativo 22% a 26% con 60% de gas refrigerante durante junio y septiembre.

Aunque se demostró el efecto de los factores carga de refrigerante y temperatura ambiente en el consumo eléctrico y en las emisiones indirectas del equipo AC, la metodología utilizada en este estudio exige realizar más campañas experimentales para abarcar un rango de temperatura más amplio a todos los niveles de carga de refrigerante y con el objetivo de mejorar los modelos, así como también considerar otras variables meteorológicas, como la humedad relativa que mostró tener un efecto importante durante la operación a distintos niveles de carga.

Finalmente, se cumplieron todos los objetivos planteados, pudiendo realizar y analizar el SEWI como una métrica adicional del impacto al calentamiento global, dejando ver los excedentes en el consumo eléctrico en condiciones de clima cálido extremo y deficiencias de refrigerante debido a fugas del mismo, lo que permitió obtener modelos del consumo eléctrico bajo las condiciones reales antes mencionadas.

### **6.1. Recomendaciones para la metodología**

Se recomienda extender la experimentación implementando cargas térmicas variables al interior del cuarto de experimentación. Lo anterior, debido a que la carga térmica para este proyecto fue fija en el espacio a climatizar.

Adicional a la temperatura a la entrada del condensador, se debe considerar la humedad relativa como otra variable independiente para ser incluida en los modelos matemáticos del consumo eléctrico.

### **6.2. Futuras investigaciones**

A continuación, se presentan algunas propuestas para continuar y profundizar en la investigación:

“Estudio multifactorial del impacto ambiental de corto plazo de un equipo AC en clima cálido extremo”. En esta propuesta, se propone analizar de manera integral y multifactorial el impacto ambiental de corto plazo de un equipo de aire acondicionado en climas cálidos extremos, centrándose en la relación entre las altas temperaturas, los hábitos de uso y mantenimiento de los equipos de aire acondicionado, y el consumo eléctrico. Específicamente, analizar las variables multifactoriales asociadas al funcionamiento de las fases de subenfriamiento y sobre calentamiento en equipos de AC. Desarrollar simulaciones partiendo de condiciones de funcionamiento reales con las variables antes analizadas y obtener los posibles diferenciales de consumo eléctrico teórico y real. Calcular el impacto ambiental en térmicos de GEI para los equipos analizados. Realizar ajustes de carga de refrigerante en los equipos previamente autorizados considerando las variables multifactoriales analizadas.

Desarrollar recomendaciones específicas para mejorar la operación y mantenimiento de equipos de aire acondicionado en climas cálidos extremos, basadas en los resultados obtenidos del monitoreo y análisis de datos.

## REFERENCIAS

- [1] Met Office. (2023). WMO Global Annual to Decadal Climate Update (Target years: 2023-2027). London, England: WMO.
- [2] Plan Estatal de Desarrollo de Baja California 2022-2027.
- [3] Garcia Cueto, Rafael & Santillán, Néstor & Quintero-Nuñez, Margarito & Ojeda-Benitez, Sara & Velázquez, Nicolás. (2013). Extreme Temperature Scenarios in Mexicali, Mexico under Climate Change conditions. *Atmosfera*. 26.
- [4] United Nations. Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects 2018.
- [5] Plan Municipal de Desarrollo Urbano Mexicali, Baja California 2022.
- [6] Lundgren-Kownacki, K.; Hornyanszky, E.D.; Chu, T.A.; Olsson, J.A.; Becker, P. Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate. *Int. J. Biometeorol.* 2018, 62, 401–412. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1493-z>.
- [7] Pavanello, F., De Cian, E., Davide, M. et al. Air-conditioning and the adaptation cooling deficit in emerging economies. *Nat Commun* 12, 6460 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26592-2>
- [8] Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California 2012.
- [9] Oropeza-Perez, I., 2016. Comparative economic assessment of the energy performance of air-conditioning within the Mexican residential sector. *Energy Rep.* 2, 147e154. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.06.002>.
- [10] Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California 2015.
- [11] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Global mitigation of non-CO2 greenhouse gases: refrigeration and air conditioning. 2014 (Acceso Noviembre 11, 2022), <https://www.epa.gov/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases-refrigeration#main-content>.
- [12] International Institute of Refrigeration, 2017. 35th inforatory note on refrigeration technologies. The impact of the refrigeration sector on climate change. IIR, France.
- [13] Non-CO2 Greenhouse Gas Data Tool | US EPA (Acceso Noviembre 11, 2022).
- [14] Gobierno de Mexico. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). México: Tercer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022).
- [15] Fischer, S. K. (1993). Total equivalent warming impact: a measure of the global warming impact of CFC alternatives in refrigerating equipment. *International Journal of Refrigeration*, 16(6), 423-428. doi:10.1016/0140-7007(93)90059-H
- [16] Pontes, A. H., Bandarra, E. P., 2016, Experimental investigation on the performance and global environmental impact of a refrigeration system retrofitted with alternative refrigerants, *International Journal of Refrigeration*.

- [17] Downey, T. and Proctor, J., 2002, "What Can 13,000 Air Conditioners Tell Us?" In Proceedings of the ACEEE 2002 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 1:53-68. Washington D.C.: American Council for an Energy-Efficient Economy.
- [18] Houcek, J. & Thedford, M., 1984, A Research into a New Method of refrigeration charging and the Effects of Improper Charging, Proceedings of the First Annual Symposium on Efficient Utilization of Energy in Residential and Commercial Buildings, Texas A & M University: 36-41.
- [19] Farzad, M. & O'Neal, D. L., 1988, An Evaluation of Improper Refrigerant Charge on the Performance of a split system air conditioner with capillary tube expansion, 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Energy Systems Laboratory Research Consortium: 921-926.
- [20] Stoecker, W.F., and Smith.III L.D., and Emde, B.N., "Influence of the Expansion Device on the Seasonal Energy Requirements of a Residential Air Conditioner," ASHRAE Transactions, Vol. 87, pt. I, 1981. pp 349-360.
- [21] Farzad, M., Stoecker, W.F. "Influence of the Expansion Device on Air-Conditioner System Performance Characteristics Under a Range of Charging Conditions" ASHRAE Transactions, Vol. 99, pt. I, 1993..
- [22] Farzad, M., 1990, Modeling the Effects of Refrigerant Charging on Air Conditioner Performance Characteristics for Three Expansion Devices, Texas A&M University, Texas, 164.
- [23] Rodriguez, A. G., 1995, Effect of Refrigerant Charge, Duct Leakage, and Evaporator Air Flow on the High Temperature Performance of Air Conditioners and Heat Pumps, Texas A&M University, Texas, 107.
- [24] Goswami, D. Y. et al., 2001, Effect of refrigerant charge on the performance of air conditioning systems. International Journal of Energy Research, 25, 8: 741-750.
- [25] Raj, Herbert & Dhasan, Mohan Lal. (2010). An experimental analysis of the effect of refrigerant charge level and outdoor condition on a window air conditioner. Thermal Science. 14. 1121-1138. 10.2298/TSCI1004121R.
- [26] Kim, W., Braun, J.E., (2012). Evaluation of the impacts of refrigerant charge on air conditioner and heat pump performance. International Journal of Refrigeration, 35(7), 1805-1814. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.06.007>.
- [27] Yusof, M.H., et.al., The Effect of Outdoor Temperature on the Performance of a Split-Unit Type Air Conditioner Using R22 Refrigerant. MATEC Web of Conferences (2018) 02012
- [28] Deymi-Dashtebayaz, M., et al. Experimental evaluation of refrigerant mass charge and ambient air temperature effects on performance of air-conditioning systems. Heat Mass Transfer 54, 803–812 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2173-6>
- [29] Reyes Rodríguez, Christian Germán, (2017) Análisis del consumo eléctrico de la vivienda residencial de dos ciudades de México, <https://hdl.handle.net/20.500.12930/1908>
- [30] Santillán-Soto, Néstor & Garcia Cueto, Rafael & Ojeda-Benitez, Sara & Cruz Sotelo, Samantha & Flores-Jiménez, David & Lambert, Alejandro & Pérez-Tello, Carlos. (2018). Uso de aire

acondicionado para un escenario climático en la década de 2050: Afectaciones energéticas y ambientales en una ciudad con clima cálido seco.

- [31] J.A. Suástegui Macías, C. Pérez Tello, A. Acuña Ramírez, A.A. Lambert Arista, H.D. Magaña Almaguer, P.F. Rosales Escobedo, A.H. Ruelas Puente, (2018). Assessment of electrical saving from energy efficiency programs in the residential sector in Mexicali, Mexico,. *Sustainable Cities and Society*,, 38, 795-805. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.031>.
- [32] Santillán-Soto N, García-Cueto OR, Lambert-Arista AA, Ojeda-Benítez S, Cruz-Sotelo SE. Comparative Analysis of Two Urban Microclimates: Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions. *Sustainability*. 2019; 11(7):2045. <https://doi.org/10.3390/su11072045>
- [33] Calderas A., Lambert, A., Montero, G., Campbell, H., y Leyva, O. (2009). Cuantificación de emisiones de gases refrigerantes en Mexicali baja California.
- [34] Belman-Flores, J., Rodríguez-Muñoz, A. P., Gutiérrez Pérez-Reguera, C., & Mota-Babiloni, A. (2017). Experimental study of R1234yf as a drop-in replacement for R134a in a domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 81, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.05.003>.
- [35] Belman-Flores, J. M., Heredia-Aricapa, Y., Pardo-Cely, D., Rodríguez-Valderrama, D. A., De Alba-Rosano, M., & Silva-Romero, J. C. (2022). Experimental evaluation of R513A as a low GWP refrigerant to replace R134a in a domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 148-155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.06.019>.
- [36] Belman Flores, J. M., Meza Enríquez, M., Arredondo Gutiérrez, U., Campos Vega, C. ., Galvan Rentería, E., & Rodríguez Valerrama, D. (2023). Estudio experimental de los refrigerantes R1234ze(E) y R516A para el reemplazo del R134a en un refrigerador doméstico. *Acta Universitaria*, 33, 1–18. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3757>
- [37] Belman-Flores, J. M., Heredia-Aricapa, Y., García-Pabón, J. J., Pérez-García, V., & Pérez-Reguera, C. G. (2023). Drop-In Replacement of R134a in a Household Refrigerator with Low-GWP Refrigerants R513A, R516A, and R1234ze(E). *Energies*, 16(8), 3422. <https://doi.org/10.3390/en16083422>
- [38] México entrega a la ONU ratificación de la enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gob.mx ([www.gob.mx](http://www.gob.mx)). Visita 15-Nov-2022
- [39] Alawadhi, Mubarak & Phelan, Patrick, “Review of Residential Air Conditioning Systems Operating under High Ambient Temperatures”, *Energies*, 2022.
- [40] Franco Guilherme, I. F., et al., “A review on the performance and environmental assessment of R-410A alternative refrigerants”, *Journal of Building Engineering*, Volume 47, 2022.
- [41] Abdelaziz, Omar, Munk, Jeffrey D., et al. ”Alternative Refrigerant Evaluation for High-Ambient Temperature Environments: R-22 and R-410A Alternatives for Mini-Split Air Conditioners”, ORNL, 2016.

- [42] UNEP, UNIDO, "Promoting Low-GWP Refrigerants for Air-Conditioning Sectors in High-Ambient Temperature Countries (PRAHA)", 2016.
- [43] UNEP, UNIDO, "EGYPRA – Promotion of Low-GWP Refrigerants GWP Refrigerants for the Air Conditioning Industry in Egypt", 2019.
- [44] del Saz, Salvador Medio ambiente y desarrollo: una revisión conceptual CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa, núm. 61, agosto, 2008, pp. 31- 49
- [45] Climate change and health (who.int) (consulta: 31/octubre/2022).
- [46] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), 1992.
- [47] Información acerca del calor extremo | Desastres naturales y tiempo severo | CDC (consulta: 30/octubre/2022).
- [48] Descripción general de los gases de efecto invernadero | US EPA (consulta: 30/octubre/2022).
- [49] IPCC, 2022: Annex II: Glossary [Möller, V, J.B.R. Matthews, R. van Diemen, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestvedt, A. Reisinger (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897-2930, doi:10.1017/9781009325844.029.
- [50] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2017). 2017 Ashrae handbook - fundamentals (si edition). American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [51] Understanding Global Warming Potentials | US EPA (consulta: 30/octubre/2022).
- [52] IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562, doi:10.1017/9781009157940.008.
- [53] AHRI 210/240-2023 (2020): Performance Rating of Unitary Air-conditioning & Air-source Heat Pump Equipment.
- [54] Secretaría de Economía y Secretaría de Energía. (2017). "NOM-021-ENER-SCFI-2017: Eficiencia energética de aparatos electrodomésticos—Aires acondicionados tipo ventana y de paquete." México.
- [55] AIRAH, 2012. Methods of calculating total equivalent warming impact (TEWI) 2012. The Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating.

[56] S. De Medio Ambiente y Recursos Naturales, «Registro Nacional de Emisiones RENE», gov.mx. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>

## ANEXOS

En esta sección se integran tablas y gráficos relacionados a la experimentación y resultados de esta investigación.

Horario	T interior C1 60%	T interior C1 80%	T interior C1 100%	T interior C2 60%	T interior C2 80%	T interior C2 100%	T interior C3 60%	T interior C3 80%	T interior C3 100%	T interior C4 60%	T interior C4 80%	T interior C4 100%	T Interior Promedio
12am - 1am	25.30	25.27	25.13	25.16	25.23	25.25	25.19	25.18	25.25	25.26	25.25	25.30	25.22
1am - 2am	25.29	25.26	25.12	25.17	25.22	25.24	25.19	25.20	25.32	25.26	25.30	25.32	25.22
2am - 3am	25.28	25.24	25.17	25.17	25.20	25.23	25.21	25.20	25.28	25.27	25.30	25.35	25.22
3am - 4am	25.26	25.22	25.15	25.18	25.21	25.24	25.23	25.24	25.35	25.31	25.30	25.38	25.21
4am - 5am	25.25	25.21	25.15	25.19	25.19	25.23	25.27	25.23	25.37	25.37	25.40	25.40	25.20
5am - 6am	25.25	25.18	25.22	25.19	25.18	25.26	25.32	25.28	25.47	25.33	25.41	25.40	25.21
6am - 7am	25.23	25.18	25.24	25.22	25.20	25.26	25.27	25.27	25.41	25.37	25.39	25.43	25.22
7am - 8am	25.25	25.18	25.22	25.22	25.19	25.33	25.27	25.26	25.36	25.34	25.41	25.38	25.23
8am - 9am	25.24	25.18	25.21	25.23	25.18	25.37	25.24	25.24	25.32	25.29	25.31	25.27	25.24
9am - 10am	25.27	25.21	25.18	25.20	25.21	25.40	25.46	25.25	25.20	25.23	25.31	25.25	25.24
10am - 11am	25.28	25.25	25.15	25.22	25.20	25.45	25.28	25.20	25.17	25.20	25.27	25.17	25.26
11am - 12pm	25.34	25.29	25.14	25.22	25.25	25.52	25.29	25.21	25.18	25.22	25.22	25.14	25.29
12pm - 1pm	25.47	25.34	25.18	25.23	25.29	25.52	25.32	25.11	25.14	25.23	25.23	25.16	25.34
1pm - 2pm	25.51	25.38	25.20	25.26	25.37	25.57	25.39	25.15	25.17	25.25	25.26	25.19	25.38
2pm - 3pm	25.57	25.57	25.29	25.56	25.51	25.56	25.49	25.23	25.26	25.32	25.36	25.34	25.51
3pm - 4pm	25.65	25.66	25.38	25.48	25.61	25.60	25.57	25.37	25.34	25.40	25.49	25.42	25.56
4pm - 5pm	25.64	25.66	25.34	25.43	25.56	25.53	25.49	25.30	25.27	25.32	25.37	25.34	25.53
5pm - 6pm	25.54	25.49	25.24	25.30	25.40	25.45	25.33	25.21	25.22	25.25	25.29	25.27	25.40
6pm - 7pm	25.60	25.48	25.22	25.30	25.40	25.63	25.33	25.18	25.17	25.24	25.26	25.26	25.44
7pm - 8pm	25.54	25.44	25.19	25.25	25.36	25.51	25.26	25.19	25.16	25.22	25.25	25.25	25.38
8pm - 9pm	25.45	25.38	25.15	25.21	25.31	25.42	25.23	25.16	25.19	25.22	25.24	25.27	25.32
9pm - 10pm	25.40	25.35	25.14	25.21	25.28	25.37	25.20	25.18	25.21	25.22	25.24	25.27	25.29
10pm - 11pm	25.34	25.32	25.13	25.19	25.27	25.30	25.21	25.17	25.22	25.23	25.23	25.27	25.26
11pm - 12am	25.32	25.29	25.14	25.19	25.24	25.29	25.18	25.18	25.23	25.22	25.26	25.29	25.24

*Anexo 1. Temperaturas horarias interiores durante experimentación.*