

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v9i17.0324>

CONVERSIÓN DE SISTEMAS SPLIT DE R22 A R290: EVALUACIÓN TÉCNICA Y PROTOCOLOS DE SEGURIDAD

CONVERSION OF R22 TO R290 SPLIT SYSTEMS: TECHNICAL EVALUATION AND SAFETY PROTOCOLS

Anchundia-López Erick Ariel ¹; Cedeño-Saltos Darwin Fabian ²;
Andrade-Solorzano Carlos Luis ³; Zuñiga-Puebla Hugo F. ⁴

¹ Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez. Manta, Ecuador.
Correo: anchundia.e.0063@istlam.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4436-2700>

² Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez. Manta, Ecuador.
Correo: cedenod.0171@istlam.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-0389-0104>.

³ Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez. Manta, Ecuador.
Correo: c.andrade@istlam.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3418-4330>.

⁴ Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
Correo: hugo.zuniga@epn.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0732-8108>.

Resumen

La investigación científica aborda la problemática crítica asociada a la transición de refrigerantes en sistemas de climatización en la región andina, específicamente en Ecuador, con los compromisos adquiridos bajo el protocolo de Montreal y la enmienda de Kigali. Este artículo se centra en la reconversión técnica integral retrofit, de equipos de aire acondicionado tipo Split, diseñados para operar con refrigerante clorodifluorometano R22, hacia el uso de propano grado refrigerante R290. El refrigerante R290 es identificado como una alternativa idónea, debido a sus excelentes propiedades termodinámicas, su nulo Potencial de agotamiento de la Capa de Ozono (ODP) y su insignificante Potencial de Calentamiento Global (GWP). El principal objetivo de este artículo es analizar la viabilidad técnica y el desempeño energético de la conversión de R22 a R290, mediante una evaluación exhaustiva de medidas operativas en condiciones de campo controladas. Se monitorearon variables críticas como presión de succión, presión de descarga, temperaturas de cambio de fase, temperatura de salida del aire del ventilador del equipo, consumo eléctrico y amperaje, durante ciclos de operación comparativos. Además, se establecen protocolos de seguridad rigurosos e indispensables para la mitigación de riesgos asociados a la alta inflamabilidad, clasificación A3 del R290. Los resultados del análisis confirman que la conversión optimiza significativamente la eficiencia energética del equipo, registrando una disminución promedio del consumo eléctrico superior al 25%, acompañado de una reducción en las temperaturas de descarga del compresor, lo cual favorece la longevidad mecánica del sistema. Sin embargo, se detectó un incremento en la temperatura de salida del aire, sugiriendo la necesidad de realizar ajustes en el dispositivo de expansión. La investigación concluye que la reconversión es una solución técnica y ambientalmente robusta, condicionada estrictamente a la implementación de protocolos de seguridad estandarizados y capacitación técnica especializada.

Palabras clave: R290, R22, eficiencia energética, inflamabilidad, conversión, termodinámica, protocolos de seguridad, climatización.

Abstract

This research addresses the critical issues associated with the refrigerant transition in air conditioning systems in the Andean region, specifically in Ecuador, in accordance with the commitments made under the Montreal Protocol and the Kigali Amendment. This article focuses on the comprehensive technical retrofit of split-type air conditioning units, designed to operate

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 13 de octubre de 2025.

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025.

Fecha de publicación: 12 de enero de 2026.



with chlorodifluoromethane (R22), to use propane as refrigerant (R290). R290 is identified as a suitable alternative due to its excellent thermodynamic properties, zero Ozone Depletion Potential (ODP), and negligible Global Warming Potential (GWP). The main objective of this article is to analyze the technical feasibility and energy performance of the conversion from R22 to R290 through a thorough evaluation of operational measurements under controlled field conditions. Critical variables such as suction pressure, discharge pressure, phase change temperatures, turbine outlet temperature, electrical consumption, and amperage were monitored during comparative operating cycles. In addition, rigorous and indispensable safety protocols are established for the mitigation of risks associated with high flammability, classification A3 of R290. The analysis results confirm that the conversion significantly optimizes the equipment's energy efficiency, registering an average decrease in electrical consumption of over 25%, accompanied by a reduction in compressor discharge temperatures, which promotes the system's mechanical longevity. However, an increase in air outlet temperature was detected, suggesting the need for fine-tuning the expansion device. The research concludes that the conversion is a technically and environmentally sound solution, strictly contingent upon the implementation of standardized safety protocols and specialized technical training.

Keywords: R290, R22, energy efficiency, flammability, conversion, thermodynamics, safety protocols, air conditioning.

1. Introducción

A nivel global la industria de la climatización y refrigeración atraviesa una transformación sin precedentes, impulsada debido a la necesidad de reducir el cambio climático y proteger la capa de ozono. A mediados del siglo XX, los HCFC y en particular el R22, se consolidaron en el uso estándar global para sistemas de aire acondicionado residenciales y comerciales ligeros debido a su estabilidad química, no inflamabilidad y propiedades termodinámicas favorables. Sin embargo, esto lleva consigo un impacto negativo sobre la capa de ozono (con un ODP de 0.055) y un

elevado Potencial de Calentamiento Global de 1810. En el contexto actual, Ecuador y otros países en vías de desarrollo se encuentran en la fase de eliminación progresiva de los HCFC. Aunque la importación de equipos nuevos con R22 está restringida aún existen equipos tipo Split que continúan operativos debido a factores económicos y a la falta de acceso a tecnologías más sostenibles, el uso de sistemas de climatización tipo Split es común tanto en entornos residenciales como comerciales (Palm, 2008; Yepes Mesa & Carranza Sánchez, 2020).

Alternativa de los Refrigerantes Naturales: La industria ha explorado diversas alternativas al R22, entre

estas se encuentra el R290. Los HFC como el R410A y el R407C surgieron como sustitutos transitorios; puesto que carecen de ODP y poseen un GWP extremadamente alto, lo que los coloca en la mira de la Enmienda de Kigali para su futura reducción. En comparativa, el R290 supone una solución definitiva y ecológica superior a los otros refrigerantes (Flores, 2023; Okolo & Ajayi, 2018)

El R290 es un hidrocarburo natural que tiene como fórmula química C_3H_8 y se destaca por tener un Poder de Agotamiento de la Capa de Ozono (PAO) de 0 y un poder de calentamiento global (PCG) de apenas 3, por sus características de eficiencia energética se puede determinar que presenta un TEWI menor que el R22. En términos termodinámicos posee propiedades de gran importancia: ebullición de $-42.1^{\circ}C$ a presión atmosférica muy similar del R22, menor viscosidad y una conductividad térmica superior. Estudios previos proponen que el R290 puede ofrecer una eficiencia energética superior, lo que reduce significativamente el consumo eléctrico entre un 10% y un 30% en comparación con los sistemas de

R22 (Devotta et al., 2005; Zuñiga-Puebla et al., 2025). Sin embargo, Morocho Tenezaca & Quito Lojano (2023) y Colbourne Daniel (2012) afirman que la incorporación masiva del R290 enfrenta una barrera técnica significativa: se clasifica en seguridad A3 según la norma ASHRAE 34, lo que indica alta inflamabilidad y baja toxicidad.

La problemática central que aborda este proyecto es la falta de estandarización técnica y validación en el proceso de "retrofit" de equipos existentes en el contexto ecuatoriano. Debido a que la mayoría de técnicos realizan conversiones de manera empírica, sin protocolos de seguridad adecuados, incrementan el riesgo de accidentes. Además, es necesario cuantificar con precisión las variaciones en el rendimiento y enfriamiento para determinar si la conversión es económicamente viable para el usuario final más allá del beneficio ambiental.

El objetivo de este artículo científico es evaluar la viabilidad técnica de la conversión de sistemas Split de R22 a R290, analizando el comportamiento de las variables termodinámicas y eléctricas, y

definiendo un protocolo de seguridad robusto para su implementación. Dicha investigación toma en cuenta varios parámetros de gran importancia dentro de su funcionamiento, entre estas se encuentran los siguientes puntos a evaluar:

- **Evaluación Energética.** – Establecer una comparación estadística de consumo de amperaje entre el sistema operativo con R22 y con el sistema R290 bajo condiciones de cargas térmicas similares tal como lo realizan otros trabajos como por ejemplo Zapata Mina et al. (2022).
- **Análisis Termodinámico.** – Analizar el comportamiento de las presiones de descarga (alta) y succión (baja), así como las temperaturas de condensación y evaporación, para establecer la expectativa de vida útil del compresor. Pillajo Paucar (2022) presenta un prototipo de instrumentación que sirve como referencia para este proceso.
- **Análisis de Capacidad.** - Determinar la efectividad del enfriamiento, este proceso de fundamenta empleando el

diferencial térmico (ΔT) registrado entre el aire de retorno y suministro (Granda Anzoategui & López Quezada, 2024).

- **Seguridad Operativa.** - Establecer lineamientos técnicos y protocolos de manejo seguro para mitigar los riesgos de inflamabilidad durante y después de la conversión (Colbourne Daniel, 2012; Estrella Muela, 2022).
- **Propiedades Fisicoquímicas.** Para establecer bases conceptuales es necesario comprender la mecánica de la conversión, es fundamental contrastar las propiedades moleculares de ambos fluidos. El R22 es clasificado como un haluro de alquilo, siendo una molécula sintética que posee una masa molecular de 86.47 g/mol, mientras que el R290 es un hidrocarburo notablemente más ligero, con una masa molecular de 44.10 g/mol. La marcada diferencia entre la composición y masa molecular conlleva implicaciones significativas dentro de los sistemas de refrigeración (Choudhari & Sapali, 2017;

Delgado Vaca & Recalde de la Torre, 2020).

A pesar de que la menor masa molar del R290 implica un flujo másico inferior un mismo desplazamiento volumétrico del compresor, sin embargo, esta limitación se compensa con un calor latente de vaporización significativamente más alto. El R290 puede absorber casi el doble de calor por kilogramo que el

R22 durante la evaporación, lo que permite que los sistemas con R290 operen con una carga de refrigerante reducida, típicamente alrededor del 40% al 50% de la masa original de R22 requerida por el equipo, lo cual es esencial para la eficiencia operativa y riesgos de inflamabilidad (Zuñiga-Puebla et al., 2025). En la Tabla 1, se muestra una comparativa entre ambos refrigerantes.

Tabla 1: Comparativa de Propiedades Termodinámicas

Propiedad	R22 (Clorodifluorometano)	R290 (Propano)	Implicación Técnica
Peso Molecular	86.47 g/mol	44.10 g/mol	Menor caída de presión en tuberías para R290.
Punto de Ebullición (1 atm)	-40.8 °C	-42.1 °C	Compatibilidad en temperaturas de evaporación.
Temperatura Crítica	96.1 °C	96.7 °C	Similar rendimiento en climas tropicales.
Presión Crítica	4.99 MPa	4.25 MPa	R290 opera a presiones críticas más bajas.
Clasificación Seguridad	A1 (No inflamable)	A3 (Altamente inflamable)	Requiere protocolos anti-chispa y ventilación.
GWP (100 años)	1810	3	R290 es sostenible a largo plazo.
Compatibilidad Aceite	Mineral (MO), Alquilbenceno	MO, POE, PAG	R290 es compatible con el aceite original del R22.

Nota: La tabla comparativa de propiedades termodinámicas de los refrigerantes R22 y R290 destacan la sostenibilidad del R290 a pesar de ser altamente inflamable.

Fuente: (Zambrano Cedeño & Rodríguez Gámez, 2022)

Una ventaja esencial del R290 en el proceso de reconversión de sistemas de R22, es la excelente miscibilidad con el aceite mineral original del equipo, esta compatibilidad asegura un retorno de aceite adecuado al cárter del

compresor, lo cual garantiza la lubricación adecuada, simplificando los costos y complejidad del proceso de reconversión. A diferencia de los refrigerantes R410A o R407C, donde es obligatorio limpiar el circuito y sustituir el aceite mineral por aceite

sintético, el cual es altamente higroscópico y costoso (Navarro Peris, 2020)

- Ciclo de Refrigeración y Eficiencia. - El ciclo de refrigeración por compresión de vapor opera bajo los mismos principios para el R290 y R22, con notables diferencias operativas que mejoran la eficiencia del R290. El R290 tiende a operar a presiones de descarga inferiores a las del R22 cuando se mantiene una misma temperatura de saturación. Dicha reducción en la relación de compresión disminuye el trabajo mecánico requerido por el motor (W_c), lo que teóricamente debe traducirse en un menor consumo de amperaje y una mejora en el Coeficiente de Rendimiento del sistema (Giler Quiroz & Morales Torres, 2021). Además, Silveira (2024) sugiere que la baja temperatura de descarga del refrigerante R290 es un elemento clave que garantiza su durabilidad, asimismo, el R22, bajo condiciones de alta relación de compresión, tiende a alcanzar temperaturas de descarga muy elevadas, lo que en

consecuencia genera un degradar en el aceite y provocar la coquización en las válvulas de escape.

- Normativa de Seguridad A3.- Para el uso seguro del R290, la inflamabilidad y la toxicidad son parámetros muy importantes, por lo que se descuidó su uso como alternativa durante muchos años. La norma internacional IEC 60335-2-40 y la norma ASHRAE 15 establecen los límites para el uso de refrigerantes inflamables, clasificado el R290 como seguridad A3. Para sistemas de aire acondicionado residencial tipo Split, la carga máxima permitida m_{max} se calcula en función del área y la altura de instalación de la unidad interior, basándose en el Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL) (Colbourne Daniel, 2012; Khai & Zakaria, 2025)

$$m_{max} = 2.5 \times LFL^{5/4} \times h \times A$$

Esta restricción constituye el protocolo de seguridad más importante y prioritario ante cualquier escenario de fuga catastrófica instantánea de toda la carga en la habitación cerrada, la concentración

de gas a nivel del suelo nunca alcance la mezcla ignitable. Este cumplimiento de cálculo es el primer y más importante protocolo de seguridad antes de cualquier intervención técnica, ya que se necesita limitar la cantidad total de gas permitida en función al volumen de la habitación, (Zapata et al., 2022)

2. Metodología

Descripción del Equipo y Entorno Experimental

La investigación se llevó a cabo utilizando un equipo de aire acondicionado tipo Split Muro (High Wall) convencional, originalmente fabricado para operar con refrigerante R22, los detalles específicos del equipo se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción del equipo de Aire Acondicionado tipo Split en entorno experimental

Capacidad Nominal	12,000 BTU/h (estimada según amperaje típico de 1 tonelada)
Voltaje de Operación	220 V / 60 Hz
Compresor	Rotativo, diseñado para R22 con aceite mineral.
Dispositivo de Expansión	Tubo capilar estándar (no se modificó geométricamente para la primera fase de pruebas para evaluar el comportamiento "drop-in", aunque se recomienda su ajuste).
Ubicación	Laboratorio de pruebas en condiciones ambientales controladas, con temperaturas ambiente oscilando entre 24°C y 30°C.

Fuente: Elaboración propia basada en datos reales.

Instrumentación y Recolección de Datos. - Para garantizar la precisión del análisis estadístico, se instrumentó el equipo con sensores calibrados:

- Manómetros: Para el registro de presiones de alta (descarga) y baja (succión) en PSI.
- Termocuplas Tipo K: Ubicadas estratégicamente en:
 - Entrada y Salida del Condensador.
 - Entrada y Salida del Evaporador.
 - Salida de aire del Split.
- Temperatura ambiente.

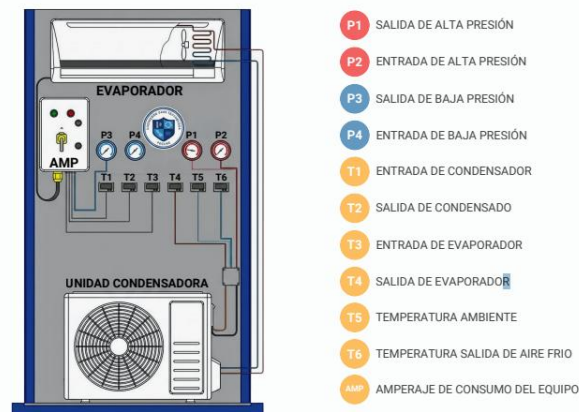
- Luces piloto Amperimétrica. -
Monitoreo continuo del
consumo de corriente

En la Figura 1, se observa un detalle de los sensores instalados en el equipo, que permiten una mejor visibilidad y control de los valores de temperatura y presión durante el funcionamiento del sistema. Esta instrumentación facilita la toma de

datos en cualquier momento del proceso, garantizando un monitoreo continuo y confiable de las variables operativas, lo que contribuye a una recolección de información precisa para el análisis y la validación de los resultados obtenidos. Además, en la Figura 2 se presenta el módulo didáctico elaborado con el que se desarrollan las pruebas.

Figura 1. Diagrama del banco de pruebas para monitoreo de variables operativas en sistemas de aire acondicionado tipo Split

CONVERSIÓN DE SISTEMAS SPLIT DE R22 A R290: EVALUACIÓN TÉCNICA Y PROTOCOLOS DE SEGURIDAD.



Fuente: Elaborado por los autores

Figura 2. Módulo experimental para evaluación técnica en la conversión de R22 a R290 en sistemas Split



Fuente: Elaborado por los autores

Se lleva a cabo el procedimiento de Conversión (Retrofit) Siguiendo los protocolos de seguridad y las mejores prácticas técnicas, el proceso de conversión se ejecutó en las siguientes etapas:

Evaluación Inicial y Recuperación: Se verificó el

funcionamiento basal del equipo. Se procedió a la recuperación del refrigerante R22 utilizando una máquina recuperadora y cilindros adecuados como se observa en la Figura 3, evitando estrictamente el venteo a la atmósfera. Se pesó el refrigerante recuperado para establecer la masa de referencia.

Figura 3. Recuperación del refrigerante R22 del equipo original.



Fuente: Elaborado por los autores

La importancia de la evaluación final permite detectar fallas previas que podrían afectar el desempeño posterior del sistema, la recuperación controlada del refrigerante es fundamental para cumplir con las normativas ambientales y de seguridad, además

de prevenir la contaminación del circuito.

Al no realizar buena ejecución, la liberación de refrigerante a la atmósfera contribuye al deterioro ambiental, no cuantificar el refrigerante recuperado impide un análisis preciso del comportamiento

del sistema y dificulta la comparación de resultados posteriores.

Detección de fugas y limpieza del sistema

- Barrido con nitrógeno seco para eliminar impurezas.
- Sustitución del filtro secador por uno compatible con R290 para asegurar la eliminación de humedad residual.
- Verificar la estanqueidad mediante presurización con nitrógeno a 300 PSI.

La limpieza del sistema es esencial para evitar reacciones químicas indeseadas y asegurar la compatibilidad del circuito con el nuevo refrigerante. El filtro secador adecuado protege componentes críticos como el compresor y la

válvula de expansión, la prueba de estanqueidad garantiza la seguridad del sistema, especialmente al trabajar con refrigerantes inflamables como es R290.

La presencia de humedad o partículas puede generar formación de ácidos, obstrucciones y fallas prematuras del compresor, fugas detectadas incrementan el riesgo de inflamabilidad, reducen la eficiencia energética y compromete la confiabilidad del sistema.

Vacío Profundo: Se conectó una bomba de vacío de doble etapa, alcanzando un vacío de 500 micrones de mercurio. Este paso es esencial en sistemas con hidrocarburos para eliminar todo rastro de oxígeno. En la Figura 4, se observa el proceso de vacío.

Figura 4. Intervención técnica para la verificación y vacío del sistema



Fuente: Elaborado por los autores

El vacío garantiza un ambiente interno libre de gases no condensables y humedad, condiciones indispensables para funcionamiento eficiente y seguro del sistema. El R290, la ausencia de oxígeno reduce significativamente el riesgo de reacciones peligrosas y mejora la transformación de calor.

Al no realizar un vacío adecuado, la presencia de aire y humedad puede generar aumento de presiones, reducción de la capacidad frigorífica, formación de hielo en la válvula de expansión y degradación del aceite lubricante, también, se incrementa el riesgo de fallas mecánicas y reduce considerablemente la vida útil del sistema.

Carga de Refrigerante R290.- Se estimó una carga de R290 equivalente al 40% - 50% de la carga de placa del R22, debido a la diferencia de densidades.

Cambio de aceite: El cambio de aceite se realiza para garantizar condiciones operativas equivalentes mediante el uso de aceite nuevo en las pruebas con R22 y R290. donde se evidencian variaciones significativas en el color y la transparencia, indicadores directos del nivel de degradación, contaminación y posible presencia de residuos ácidos o humedad. Este análisis visual preliminar permite identificar el estado del lubricante y justificar la necesidad de su reemplazo previo a la conversión del sistema a R290, con el fin de garantizar condiciones operativas seguras, compatibilidad química y un desempeño eficiente del equipo durante las pruebas técnicas realizadas con ambos refrigerantes. En la figura 5, se observa el estado del aceite removido del equipo.

Figura 5. Evaluación visual del grado de degradación del aceite lubricante en un sistema Split tras la recuperación de R22



Nota: La comparación visual del aceite lubricante retirado del sistema de refrigeración después de la recuperación del refrigerante R22, evidenciando distintos niveles de degradación.

Fuente: Elaborado por los autores

Carga de refrigerante: El equipo de refrigeración original utilizado, diseñado originalmente para operar con refrigerante R22, con una potencia de 0,75 HP, la carga nominal especificada por el fabricante es de 760 gramos, valor que garantiza un funcionamiento adecuado del sistema en condiciones normales de operación. Al realizar la conversión a refrigerante R290 (propano), es necesario aplicar criterios técnicos y normas de seguridad debido a sus diferentes propiedades termodinámicas y a su carácter inflamable. En este argumento, la carga de R290 se establece comúnmente en aproximadamente del 40 % al 50 % de la carga original

de R22, lo que corresponde a alrededor de 300 gramos, tomando como referencias prácticas recomendadas en procesos de reconversión, con el fin de mantener un desempeño eficiente del sistema y reducir los riesgos asociados a una sobrecarga de refrigerante. En la Figura 6, se observa el proceso de carga de refrigerante.

La carga se realizó exclusivamente por peso utilizando una balanza digital de precisión. Se cargó lentamente monitoreando las presiones hasta alcanzar un rendimiento estable. Además, se etiquetó el equipo con señalética de seguridad amarilla "Gas Inflamable A3" en la evaporadora y condensadora.

Figura 6. Carga de refrigerante durante el mantenimiento del aire acondicionado tipo Split



Fuente: Elaborado por los autores

Método de análisis del equipo con R22 y R290.

Con el propósito de garantizar una evaluación rigurosa y sistemática del desempeño del equipo de aire acondicionado tipo Split antes y después del proceso de reconversión de refrigerante, se definió un protocolo experimental estructurado en dos fases operativas claramente diferenciadas. Dicho protocolo permitió asegurar la repetibilidad del ensayo y la comparabilidad directa de los resultados obtenidos bajo condiciones de operación controladas.

El proceso de recolección de datos se desarrolló conforme a las siguientes etapas:

- **Fase R22:** operación continua del equipo con su carga original de refrigerante R22 durante un periodo de tres días consecutivos, con el objetivo de establecer la línea base de desempeño térmico y energético del sistema.
- **Fase R290:** operación del mismo equipo tras la ejecución del proceso de retrofit y la

posterior carga con refrigerante R290, manteniendo idénticas condiciones operativas y una duración de tres días consecutivos, a fin de evaluar los efectos de la reconversión.

En ambas fases, las mediciones se realizaron en tres franjas horarias representativas de diferentes niveles de carga térmica:

- **Tres mediciones por tres días mañana (08:00 – 08:30):** condiciones de baja a media demanda térmica.
- **Tres mediciones por tres días tarde (14:00 – 14:30):** periodo de máxima carga térmica, correspondiente al pico de calor.
- **Tres mediciones por tres días noche (20:00 – 20:30):** condiciones de demanda térmica reducida y mayor estabilidad ambiental.

Este enfoque metodológico permitió analizar el comportamiento del sistema en distintos escenarios de operación, asegurando una base sólida para la comparación del rendimiento del equipo antes y después del proceso de reconversión.

Análisis Estadístico

Los datos recolectados en la investigación fueron procesados para obtener medidas de tendencia central y dispersión. Posteriormente se compararon los promedios diarios y por franja horaria para cada variable: presión, temperatura y amperaje. Además, se realizó el

calculó del porcentaje de variación para cuantificar la mejora o degradación del rendimiento.

3. Resultados y discusión

El análisis detallado se basa en los datos experimentales suministrados. En la Tabla 3, se desglosan los resultados por variable crítica.

Tabla 3. Comparativa de Consumo de Corriente (Amperios)

Día Experimental	Franja Horaria	Promedio R22 (A)	Promedio R290 (A)	Reducción (A)	% Ahorro
Día 1	Mañana	3.40	2.57	0.83	24.4%
	Tarde (Pico)	3.77	2.50	1.27	33.6%
	Noche	3.40	2.57	0.83	24.4%
Día 2	Mañana	3.40	2.53	0.87	25.6%
	Tarde (Pico)	3.67	2.57	1.10	30.0%
	Noche	3.40	2.57	0.83	24.4%
Día 3	Mañana	3.43	2.70	0.73	21.3%
	Tarde (Pico)	3.37	2.87	0.50	14.8%
	Noche	3.37	2.77	0.60	17.8%
PROMEDIO TOTAL		3.47 A	2.63 A	0.84 A	24.1%

Fuente: Elaboración propia basada en datos reales.

Los datos muestran una reducción constante y notable del consumo eléctrico, con ahorros que superan el 30% en los periodos de mayor carga térmica. Se evidencia que el R290 ofrece una eficiencia energética mayor en el sistema de refrigeración, incluso en el día 3, cuando el R290 consumió un poco más que en días anteriores, su gasto siguió siendo mucho menor que el del R22. El

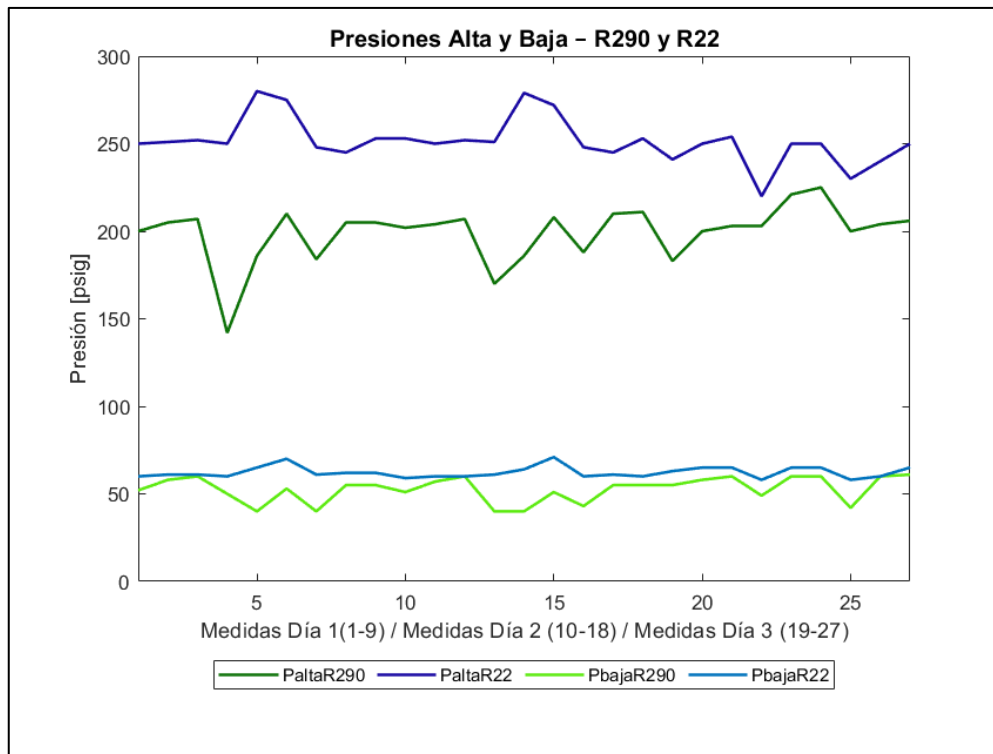
promedio total de las mediciones demuestra que el R290 consumió solo 2.36A a diferencia de los 3.47A del R22, esta mejora se debe a la menor densidad y presión de operación del propano, que reduce el esfuerzo del compresor. El ahorro es aún más notable en franjas pico, donde se la reducción porcentual alcanza el 33.6%, demostrando que

el R290 opera de manera eficiente ante las altas demandas.

En la Figura 7, se presenta los datos que se han tomado para ambos refrigerantes (R22 y R290) de la

presión alta y baja, en general se observa que la presión de alta con R22 en un rango entre 30 y 50 psig. La presión de baja igual es mayor con R22 pero en un rango entre 10 y 20 psig.

Figura 7. Presiones Alta y Baja con R290 y R22



Fuente: Elaboración propia basada en datos reales.

A continuación, se presenta análisis más detallados de presión alta.

- R22: Los registros indican presiones persistentemente altas. En el Día 1 durante la tarde, la presión alcanzó 278 PSI y 280 PSI. En el Día 2, subió a 279 PSI. Estas presiones altas ejercen una tensión mecánica severa sobre el compresor.

- R290: Las presiones de descarga fueron notablemente más bajas. El máximo registrado fue de 225 PSI (Día 3, Tarde), pero el valor medio se mantuvo en el rango de 180 PSI y 210 PSI.

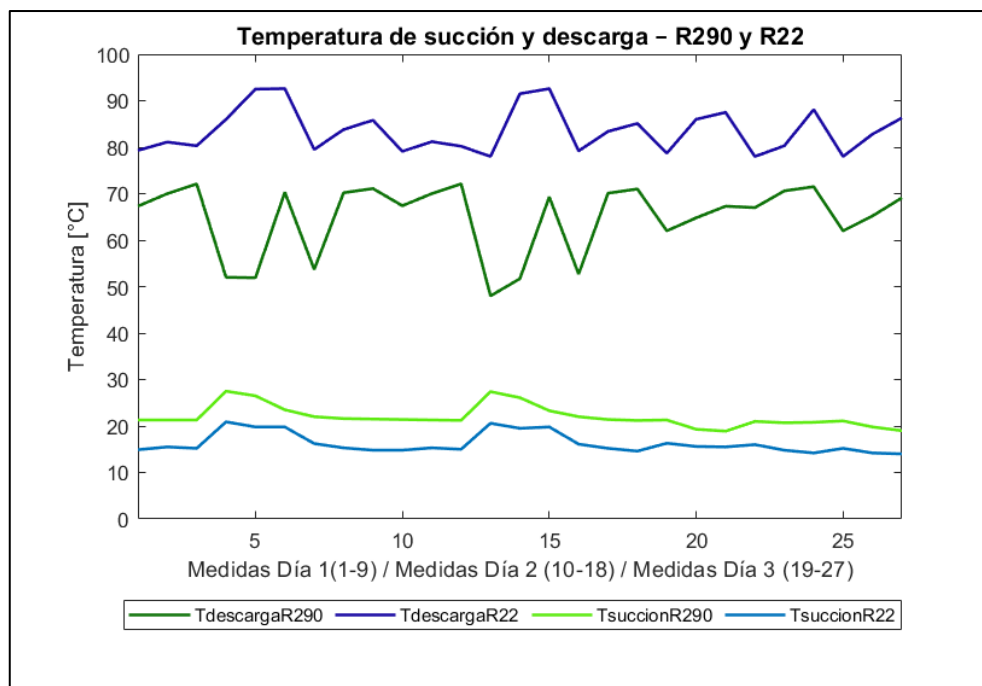
A continuación, se presenta análisis más detallados de presión baja (succión)

- R22: Se mantuvo estable en el rango de 60 - 70 PSI.
- R290: Operó en un rango de 40 - 60 PSI. Una presión de 50 PSI en R290 corresponde a una temperatura de saturación de aprox. -4°C . Esto indica que el R290 está evaporando a una temperatura menor dentro del serpentín, lo que podría aumentar el riesgo de congelamiento del evaporador si el flujo de aire no es suficiente,

un punto a vigilar en el mantenimiento.

En la Figura 8, se presenta los datos de temperatura de succión y descarga con R290 y R22, en general la temperatura de descarga con R22 es mayor que con R290, en cuanto a la temperatura de succión es mayor con R290 lo que indica que el sobrecalentamiento es más alto con propano.

Figura 8. Temperatura de succión y descarga con R290 y R22



Fuente: Elaboración propia basada en datos reales.

Para analizar el comportamiento térmico, a continuación, se detalla datos relevantes de la temperatura de descarga.

- R22: Alcanzó temperaturas de entrada al condensador altas. El Día 1 a las 14:15 PM registró 92.5°C , y el Día 2 alcanzó 91.5°C , estas temperaturas

están cerca del límite de degradación térmica del aceite mineral.

- R290: Mantuvo temperaturas mucho más moderadas. En condiciones similares (Día 1 Tarde), registró 51.9°C y 70.3°C.

Temperatura del aire a la salida del Split:

- R22: Alcanzo temperatura de salida de aire muy bajas, aproximadamente entre 12.0°C y 14.0°C en las mañanas y noches, ascendiendo a 16.7°C - 17.2°C en las tardes calurosas.
- R290: Mostró temperaturas de salida ligeramente superiores. En las mañanas osciló entre 16.0°C y 17.0°C, y en las tardes se mantuvo entre 18.7°C y 21.2°C (Día 1) o 16.5°C - 18.2°C (Día 2 y 3).

Análisis de Rendimiento. - El diferencial de temperatura ΔT fue mayor para el R22. (Ejemplo (Día 1, 08:00): R22 $\Delta T = 26.6 - 14.2 = 12.4^\circ\text{C}$. R290 $\Delta T = 25.4 - 17.0 = 8.4^\circ\text{C}$), esta diferencia propone que al usar la configuración de expansión original (capilar de R22) o en su defecto que se debe aumentar la cantidad de propano, el R290 no logra llenar por completo el

evaporador o lo hace con un sobrecalentamiento excesivo, reduciendo la capacidad frigorífica total (BTU/h) del sistema, a pesar de su alta eficiencia energética. Como consecuencia, el equipo "enfria menos" a pesar de la alta eficiencia energética del R290.

Análisis de seguridad y operativos del R290

Se establece un perímetro de seguridad de tres metros alrededor del equipo, el cual deben eliminarse todas las fuentes de ignición, como cigarros, celulares no certificados, interruptores y herramientas eléctricas convencionales; además, asegurar una ventilación adecuada, ya sea natural o mecánica, y en espacios cerrados colocar ventilación a nivel del sueño, considerando que el propano tiende a concentrarse en zonas bajas.

Herramientas específicas:

- Bomba de vacío (Spark-less) o con interruptor sellado en zonas ventiladas.
- Recuperadora homologada para hidrocarburos.
- Detectores electrónicos calibrados para HC o solución jabonosa.

- Extintor de polvo químico seco (ABC) de 2 kg.

La compatibilidad del R290 con el aceite mineral original del R22 facilita la reconversión sin necesidad de cambios adicionales en el circuito, considerando, así como una ventaja significativa en términos de costos y tiempo de implementación.

En el manejo del circuito, queda prohibido el uso de soldaduras en sistemas que contengan o hayan contenido R290, debiendo emplearse uniones mecánicas en frío o conexiones abocinadas de alta calidad con sellador, es necesario realizar un proceso riguroso de vacío hasta 500 micrones para eliminar el oxígeno, pudiendo romperse el vacío con una mínima carga de R290, en fase vapor o procede directamente a la carga del refrigerante.

Mitigación de chispas internas

Establece que, en equipos antiguos diseñados para R22, los contactores y relés abiertos pueden generar arcos eléctricos, se recomienda sustituirlos por relés de estaos solidos o sellados herméticamente; si no es viable, la caja eléctrica debe reubicarse al exterior o garantizar una ventilación adecuada que evite

la acumulación de gas cerca de la electrónica, además de verificar el estado del capacitor, ya que uno deteriorado puede provocar explosión y originar una chispa de ignición.

La carga y etiquetado del sistema se debe realizar exclusivamente por peso calculado, evitando cualquier ajuste empírico por presión, una vez finalizado el proceso, se coloca etiquetas permanentes y visibles que adviertan que el equipo contiene R290 y es inflamable, como medida esencial de seguridad para futuras intervenciones técnicas.

Discusión

La discusión de los resultados valida la hipótesis de que el R290 es un refrigerante energéticamente superior, confirmando una reducción del amperaje del 25%, es un dato contundente que se alinea con investigaciones previas citadas en la literatura, donde se reportan ahorros del 10% al 30%. Esta eficiencia se atribuye a una menor relación de compresión y un menor trabajo de desplazamiento volumétrico. Sin embargo, se identificó una brecha en la capacidad de enfriamiento, manifestada por una temperatura de salida de aire 3°C o 4°C más alta con

R290, este hecho indica que el capilar original es restrictivo para el nuevo refrigerante o que la carga requiere un ajuste fino del sobrecalentamiento. El R290 tiene un calor latente mayor, por lo que requiere menos masa, pero su densidad es menor. Si el capilar restringe demasiado el flujo, el evaporador se "hambrea", reduciendo el efecto frigorífico neto.

Para lograr una Retrofit de alto rendimiento y optimizar la capacidad de enfriamiento, no basta con cambiar el refrigerante, se recomienda ajustar ligeramente la longitud del tubo capilar, acortándolo entre un 10% y un 15%, esta modificación podrá permitir un mayor flujo másico de R290, mejorando la presión de succión y el llenado del evaporador, ya que no basta con cambiar el gas, lo que acercaría el rendimiento al R22, aunque podría sacrificar una pequeña fracción del ahorro energético. lo que aumentaría la presión de succión y llenaría mejor el evaporador, bajando la temperatura de salida de aire y acercándola al rendimiento original del R22, aunque esto podría sacrificar una pequeña fracción del ahorro energético obtenido. Aún en

su estado "drop-in", el equipo es funcional y capaz de climatizar, aunque tardará más tiempo en abatir la carga térmica inicial.

Desde la perspectiva de la vida útil del equipo, la conversión a R290 es indiscutiblemente beneficiosa. Las temperaturas de descarga observadas con R22, que superan los 90°C, son peligrosamente altas y pueden degradar el aceite mineral, provocando coquización en las válvulas de escape y reduciendo la longevidad del compresor. Puesto que la viabilidad técnica está demostrada, la barrera final es la seguridad del R290 debido a su alta inflamabilidad, su manejo no permite errores. La viabilidad técnica de esta reconversión está demostrada, pero la seguridad se erige como la barrera final y más crítica. El R290 al ser clasificado A3 requiere de la implementación de protocolos de seguridad rigurosos y estandarizados es absolutamente indispensable para mitigar los riesgos asociados a su inflamabilidad.

El protocolo de intervención técnica para la reconversión a R290, enfatiza medidas importantes de seguridad y manejo adecuado del

sistema. Es preciso incluir medidas específicas, como la delimitación de un perímetro de seguridad, eliminar fuentes de ignición y utilizar herramientas homologadas y apropiadas, buscando minimizar los riesgos de la alta inflamabilidad del refrigerante.

Evaluación de riesgo de R290 está clasificado como A3, alta inflamabilidad y baja toxicidad, lo cual requiere una capacitación especializada para técnicos y así también la incorporación de protocolo estrictos, por alta inflamabilidad y baja toxicidad, presenta límites de inflamabilidad entre 2.1% (LFL) y 9.5% (UFL) en volumen de aire. Su ignición ocurre solo cuando coinciden simultáneamente tres elementos:

La presencia de combustible R290 en concentraciones superiores al 2.1 %, el oxígeno (aire) y una fuente de ignición capaz de generar una chispa mayor a 0.25 mJ. El objetivo principal es evitar la concurrencia de estos factores. Ejecutar este protocolo es fundamental para aprovechar la mayor eficiencia y menos estrés térmico en los componentes, sin comprender la seguridad del personal y del entorno.

4. Conclusiones

La investigación realizada permite concluir de manera categórica que la conversión de sistemas de aire acondicionado Split de R22 a R290 se posiciona como una estrategia técnica y ambientalmente sólida, aunque no exenta de desafíos que requieran una gestión cuidadosa. Esta transición es una necesidad dentro de los compromisos ambientales internacionales, como el Protocolo de Montreal y la Enmienda de Kigali, que buscan la eliminación progresiva de refrigerantes con alto potencial de agotamiento de la capa de ozono y elevado potencial de calentamiento global.

Se demostró estadísticamente una reducción promedio del 24.1% en el amperaje del sistema. Esto convierte al retrofit con R290 en una herramienta poderosa para la eficiencia energética nacional y la reducción de costos operativos para el usuario. Esta eficiencia se atribuye a las propiedades termodinámicas que permiten una menor relación de compresión y un menor trabajo mecánico del compresor, no solo disminuye el costo operativo, sino que también contribuye a la

sostenibilidad ambiental al reducir la demanda energética. Lo que indica una disminución significativa en el consumo eléctrico, costos operativos para los usuarios, y huella de carbono asociada a la climatización.

La reconversión a R290 confiere una robustez mecánica superior al sistema, puesto que, los datos revelan que el R290 opera con presiones de descarga un 22% menores y temperaturas de descarga reducidas inferiores, hasta 40°C menos en picos, en comparación con el R22. Esta operación reduce significativamente el estrés mecánico y térmico sobre el compresor, un componente crítico y a menudo el más vulnerable del sistema.

Aunque el sistema presenta una mayor eficiencia energética, se observó una ligera reducción en la capacidad de enfriamiento instantánea, medida a través de (ΔT) del aire, en comparación con el R22 bajo una configuración tipo drop-in; por ello, se concluye que para optimizar el confort térmico es recomendable ajustar el sistema de expansión (capilar), sin que esto sea indispensable para un funcionamiento básico aceptable.

La sustitución del R22, con valores de PAO 0.055 y PCG 1810, por R290, con PAO de cero y PCG de 3, constituye un beneficio ambiental significativo, ya que reduce de forma drástica el impacto ecológico y contribuye al cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible en el sector de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC).

Este factor exige implementar protocolos de seguridad estrictos y estandarizados en todas las etapas de manipulación, desde la recuperación del R22 hasta la carga del R290, el uso de herramientas antideflagrantes, procedimientos eléctricos seguros y técnicas de carga precisas, con cálculos exactos de la carga máxima permitida. La capacitación especializada y la certificación del personal técnico son indispensables para garantizar que estos protocolos se apliquen de manera efectiva.

Bibliografía

- Choudhari, C. S., & Sapali, S. N. (2017). Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems. *Energy Procedia*, 109, 346–352. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.084>
- Colbourne Daniel. (2012). *Guidelines for the safe use of hydrocarbon refrigerants*.
- Delgado Vaca, H. P., & Recalde de la Torre, D. R. (2020). *Análisis comparativo del rendimiento de una bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar utilizando hidrocarburos como fluidos de trabajo* [Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18543>
- Devotta, S., Padalkar, A. S., & Sane, N. K. (2005). Performance assessment of HC-290 as a drop-in substitute to HCFC-22 in a window air conditioner. *International Journal of Refrigeration*, 28(4), 594–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.09.013>
- Estrellla Muela, J. E. (2022). *Implementación de un módulo didáctico de un sistema de aire acondicionado tipo split de refrigerante R290: Sistema de refrigeración del módulo didáctico*. [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23124>
- Flores, W. M. V. J. L. C. L. (2023). *Flores, W. M. V., & Lara, J. L. C. (2023). Implementación de hidrocarburo en un sistema de aire acondicionado para reducir el consumo de energía eléctrica y el impacto ambiental. Tesis Doctoral* [Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC]. <https://repositorio.unitec.edu/server/api/core/bitstreams/20e2d564-c46a-49ad-b578-584d86640ac7/content>
- Giler Quiroz, H. R., & Morales Torres, M. J. (2021). *Implementación de un banco de pruebas de sistemas para el acondicionamiento de aire en el laboratorio de electromecánica de la UTC Extensión La Maná* [Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7939>
- Granda Anzoategui, G. L., & López Quezada, A. P. (2024). *Análisis térmico del proceso de refrigeración del agua caliente proveniente de reactores mediante torres de enfriamiento* [Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28182>

- Khai, F. N. S., & Zakaria, N. S. (2025). The Impact of Hydrocarbon R290 Refrigerant on Air Conditioner Performance and Environmental Sustainability. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 33(2), 1069–1087.
<https://doi.org/10.47836/PJST.33.2.24>
- Morocho Tenezaca, W. G., & Quito Lojano, H. D. (2023). *Diseño de un sistema de climatización con monitoreo y control automatizado para un Data Center de una institución financiera* [Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24342>
- Navarro Peris, E. (2020). *Estudio teórico-experimental de compresores de pistón herméticos con diferentes refrigerantes* [Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/135957>
- Okolo, T. I., & Ajayi, O. O. (2018). Thermal Performance and Energy Consumption Analyses of R290 and R22 Refrigerants in Air-conditioning System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 413, 012072.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/413/1/012072>
- Palm, B. (2008). Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems – A review. *International Journal of Refrigeration*, 31(4), 552–563.
<https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2007.11.016>
- Pillajo Paucar, O. A. (2022). *Diseño y construcción de un prototipo portátil no invasivo para el análisis de sistemas de refrigeración por compresión de vapor para el laboratorio de termodinámica de la FIM – EPN*. [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23462>
- Silveira, J. M. (2024). *Comparação da eficiência energética de um sistema de condicionamento de ar de múltiplos evaporadores operando com o gás R22 versus R438A*. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/261093>
- Yepes Mesa, A. F., & Carranza Sánchez. (2020). *Estudio sobre la implementación del refrigerante R290 como sustituto del R410a en un equipo acondicionador de aire* [Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://hdl.handle.net/11059/13112>
- Zambrano Cedeño, J. E., & Rodríguez Gámez, M. (2022). Las técnicas de reconversión de gases refrigerantes en los

equipos de clima convencionales y la reducción de los impactos ambientales. *Ingeniar*, 5(10). <https://doi.org/10.46296/ig.v5i10edespsep.0072>

Zapata Mina, J., Restrepo Victoria, Á., & Andrés Andrade, Á. (2022). *Análisis exergético del R290 como sustituto del R410A en un acondicionador de aire variable operando con diferentes cargas de refrigerante*. <https://doi.org/10.5944/BICIM.2022.229>

Zuñiga-Puebla, H. F., Catalina Vallejo-Coral, E., & Naranjo-Mendoza, C. (2025). Experimental Study of the Thermodynamic and Operational Performance in a Refrigeration System Using R290 as a Replacement for R22. *ASHRAE Transactions*. <https://doi.org/10.63044/w25pue46>