



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA RECONVERSIÓN DEL REFRIGERANTE R22 POR  
R290 EN UN AIRE ACONDICIONADO**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**

**INGENIERA EN MECATRÓNICA**

**PRESENTADO POR:**

**21611207 DANIELA MARÍA LEIVA CARVAJAL**

**ASESOR: ALBERTO MAX CARRASCO BARADALES**

**ALICIA MARÍA REYES DUKE**

**CAMPUS: SAN PEDRO SULA; JULIO, 2020**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a Dios que me ha brindado las fuerzas para terminar la primera fase de mi carrera universitaria. A mi papá y mamá por todo su amor, esfuerzo y sacrificio para darme una educación. A mis hermanas que me han acompañado y apoyado en cada una de las etapas de mi vida. A mis amigos por todo lo que hemos vivido. Y a mis profesores por todo el conocimiento que me brindaron.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a:

Los asesores de este trabajo, la Ing. Alicia Reyes y el Ing. Alberto Carrasco, mis asesores metodológicos, y el Ing. Pablo Iscoa, mi asesor temático, por contribuir en cada paso de la realización de esta investigación.

## RESUMEN EJECUTIVO

La necesidad por encontrar alternativas sostenibles a los procesos actuales está presente en todas las industrias. El cambio climático es una realidad que ya no puede ser ignorada y es provocado por la contaminación producida por actividades industriales, siendo una de estas los sistemas de refrigeración en todas sus áreas de aplicación. Uno de los mayores contribuyentes son los aires acondicionados debido a que para el funcionamiento correcto de estos se utilizan los refrigerantes que pueden ser dañinos para el medio ambiente, debido a que sus emisiones se quedan atrapadas en la estratosfera convirtiéndolos en gases de efecto invernadero y contribuyendo al calentamiento global. La presente investigación buscaba estudiar el costo beneficio del proceso de reconversión en un aire acondicionado del refrigerante R22 al refrigerante R290 que es de origen natural y bajo impacto. En primer lugar, se comprobó cómo iba a afectar al sistema mecánico aplicando el mismo escenario termodinámico a ambos refrigerantes, por medio del *software Engineering Equation Solver*, lo que dio como resultado un sistema con mayor capacidad de absorción de calor y menor esfuerzo mecánico. Seguidamente, se calculó un costo beneficio mayor a 1 lo que determina que es un procedimiento beneficioso. Por último, se hizo un análisis ambiental y se llegó a la conclusión de que las emisiones de calentamiento global eran mucho menores para el refrigerante R290, como se esperaba.

**Palabras claves:** HC, R22, R290, Reconversión, Refrigerantes.

## **ABSTRACT**

The necessity to find sustainable alternatives to current procedures is present in every industry. Climate change is a reality that cannot be ignored anymore and is mainly due to the pollution produced by industrial activities and a great example of this are refrigeration systems in all of their applications. Air conditioners are one of the problems because to work they use harmful refrigerants that can cause ozone depletion or greenhouse emissions producing global warming. The reason for this investigation was to study the cost benefit of substituting a R22 refrigerant to a R290 refrigerant in an air conditioner, this because of its natural origin and low impact. First, it was investigated how the mechanical system would react applying the same thermodynamic design, this was achieved through the software Engineering Equation Solver, and it resulted in a system with greater heat absorption capacity and lower mechanical effort. Then, the cost benefit of the project was calculated, and it resulted in a value greater than 1 which means economically its viable. Lastly, an environmental analysis was performed and the carbon dioxide emissions for R290 were significantly lower, as expected.

**Key words:** *Hydrocarbons, R22, R290, Reconversion, Refrigerants.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
II.	PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	2
2.1	Precedentes de la investigación.....	2
2.1.2	Precio de energía en Honduras .....	6
2.2	Definición del problema.....	6
2.3	Justificación.....	7
2.4	Preguntas de investigación.....	8
2.5	Objetivos .....	9
2.5.1	Objetivo general .....	9
2.5.2	Objetivos específicos.....	9
III.	MARCO TEÓRICO.....	10
3.1	Análisis de la situación actual.....	10
3.2	Refrigeración.....	12
3.2.1	Termodinámica en la refrigeración.....	12
3.2.2	Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.....	14
3.2.3	Grafica Presión-Entalpía.....	15
3.3	Refrigeración mecánica .....	16
3.3.1	Compresor .....	17
3.3.2	Condensador.....	17
3.3.3	Evaporador.....	18
3.3.4	Expansión .....	18
3.3.5	Aire acondicionado.....	18

3.3.6	Carga térmica.....	19
3.4	Refrigerantes.....	20
3.5	Impacto ambiental de los refrigerantes .....	21
3.5.1	Agotamiento de la capa de ozono .....	21
3.5.2	Calentamiento global.....	21
3.5.3	Regulaciones .....	22
3.6	Alternativas existentes.....	22
3.6.1	Hidrocarburos como refrigerantes .....	23
3.6.2	Inflamabilidad y consideraciones de seguridad .....	23
3.6.3	Fuentes de ignición.....	24
3.6.4	Carga permisible.....	25
3.7	R290 como sustituto del R22 .....	25
3.7.1	Propiedades físicas.....	26
3.7.2	Características de seguridad .....	26
3.7.3	Rendimiento y eficiencia energética .....	27
3.7.4	Impacto ambiental.....	29
3.8	Análisis económico.....	29
3.8.1	Costo-beneficio.....	30
3.8.2	Análisis de sensibilidad .....	30
IV.	METODOLOGÍA.....	31
4.1	Enfoque.....	31
4.2	Variables de investigación .....	31
4.2.1	Variables dependientes.....	31

4.2.2	Variables independientes .....	32
4.3	Hipótesis.....	34
4.3.1	Hipótesis de investigación .....	35
4.3.2	Hipótesis nula .....	35
4.4	Técnicas e instrumentos.....	35
4.5	Metodología de estudio.....	36
4.6	Cronograma de actividades .....	37
V.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	39
5.1	Determinación de parámetros .....	39
5.1.1	Localización .....	39
5.1.2	Diseño termodinámico.....	39
5.1.3	Método de implementación.....	40
5.1.4	Sustitución del refrigerante original.....	40
5.1.5	Proyección financiera.....	41
5.2	Recolección de datos.....	42
5.2.1	Cálculo de carga permisible .....	42
5.2.2	Tubo capilar.....	43
5.2.3	Cálculo de cargas térmicas .....	43
5.2.4	Ciclo R22 .....	44
5.2.5	Ciclo R290.....	45
5.2.6	Elaboración del programa.....	46
5.3	Análisis técnico .....	46
5.3.1	Capacidad frigorífica .....	47

5.3.2	Flujo másico.....	47
5.3.3	Efecto de refrigerante .....	48
5.3.4	Trabajo de compresor .....	48
5.3.5	Potencia.....	49
5.3.6	Calor de condensador .....	49
5.3.7	Relación de compresión.....	50
5.3.8	Coeficiente de rendimiento.....	51
5.3.9	Eficiencia energética.....	51
5.4	Análisis económico.....	52
5.4.1	Costo de la reconversión.....	52
5.4.2	Costo de electricidad .....	53
5.4.3	Costo Beneficio .....	54
5.4.4	Análisis de sensibilidad .....	54
5.5	Análisis ambiental.....	55
VI.	CONCLUSIONES .....	57
VII.	RECOMENDACIONES.....	58
	Bibliografía .....	59
	Anexos.....	65

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 – Línea del tiempo de desarrollo de refrigerantes .....	2
Ilustración 2- Porcentaje de consumo de energía sector residencial .....	5
Ilustración 3- Consumo de HCFC en región .....	7
Ilustración 4 – Nivel de ozono sobre la Antártica.....	8
Ilustración 5-Ciclo ideal de refrigeración: (a) Circuito (b) diagrama T-E.....	15
Ilustración 6-Regiones del Mollier.....	16
Ilustración 7 – Grupos de seguridad.....	23
Ilustración 8 – Variables de la investigación.....	32
Ilustración 9-Variables dependientes e independientes.....	33
Ilustración 10 – Variables económicas .....	34
Ilustración 11 – Metodología de investigación.....	36
Ilustración 12 – Estrategia de investigación.....	37
Ilustración 13 – Cronograma de actividades .....	38
Ilustración 14 – Precio de la electricidad.....	42
Ilustración 15 – Análisis de carga térmica.....	43
Ilustración 16 – Mollier R22.....	44
Ilustración 17 – Ciclo R22.....	44
Ilustración 18 – Mollier R290 .....	45
Ilustración 19 – Ciclo R290 .....	45
Ilustración 20 – Capacidad frigorífica .....	47
Ilustración 21– Flujo másico.....	47
Ilustración 22– Efecto refrigerante .....	48

Ilustración 23- Trabajo de compresor.....	48
Ilustración 24 – Potencia .....	49
Ilustración 25 – Calor de rechazo.....	50
Ilustración 26 – Relación de compresión .....	50
Ilustración 27 – Coeficiente de rendimiento.....	51
Ilustración 28 – Eficiencia energética.....	51
Ilustración 29 - Recuperación del refrigerante R22 .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- <i>ODP Y GWP</i> de refrigerantes .....	4
Tabla 2 – Evolución de precios de energía en Honduras.....	6
Tabla 3-Propiedades físicas del R22 vs R290.....	26
Tabla 4-Propiedades de seguridad del R290 .....	27
Tabla 5-Impacto ambiental R22 vs R290 .....	29
Tabla 6 – Proyección precio de electricidad .....	41
Tabla 7 – Resultados.....	46
Tabla 8 – Presupuesto de la reconversión.....	52
Tabla 9 – Gasto en electricidad anual para R22 .....	53
Tabla 10 – Gasto en electricidad anual para R290 .....	53
Tabla 11-Análisis de sensibilidad .....	54

## LISTA DE SIGLAS Y GLOSARIO

**AHRI** Instituto de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración.

**ASHRAE** Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.

**Adiabático** No existe intercambio de calor con los alrededores.

**CFC** Refrigerante clorofluorocarbonos.

**EER** Índice de eficiencia energética.

**GWP** Potencial de calentamiento global.

**HC** Refrigerante hidrocarburo.

**HCFC** Refrigerante hidroclorofluorocarbonos.

**HFC** Refrigerante hidroclorofluorocarbonos.

**Isentrópico** Entropía constante.

**ODP** Potencial de agotamiento de capa de ozono.

**POE** Aceite poliolester.

**Reconversión** Acción o proceso de convertir a un estado diferente. Modernizar.

**SEER** Razón de eficiencia energética estacional.

**TEWI** Índice de calentamiento global en equivalentes térmicos.

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos más importantes en la sociedad moderna son los sistemas de refrigeración debido a que proveen no solo comodidad, sino que también condiciones de vida y trabajo óptimas. Algunos de los que se utilizan en los hogares normalmente son las refrigeradoras, aires acondicionados y calefacción, pero también se puede encontrar la presencia indirecta de estos en la vida de las personas, por ejemplo, en los productos alimenticios. Debido al cambio climático que se vive en todos los países y un aumento, a causa de este, de las especies de flora y fauna que están en peligro de extinción, los ingenieros se encontraron en la responsabilidad de crear métodos que permitan el uso de estos sistemas, en específico los de aire acondicionado, de una manera sostenible. El Protocolo de Montreal ha ayudado a la causa estableciendo leyes para la eliminación de los refrigerantes más dañinos para el año 2030. De esta manera, han surgido distintas alternativas y una de las más sostenibles para el medio ambiente son los hidrocarburos.

El motivo de esta investigación es determinar las consecuencias de la reconversión al utilizar un hidrocarburo como sustituto de los refrigerantes convencionales. La importancia de estudiar un refrigerante de origen natural es su bajo impacto ambiental y sus propiedades. Una de las preocupaciones de los expertos al utilizar estas sustancias es su alta inflamabilidad y toxicidad para el ser humano.

El estudio se realizará analizando matemáticamente los diversos componentes mecánicos del sistema para poder predecir su funcionamiento al momento de la reconversión. A su vez, se analizará el costo beneficio por medio de la inversión y los ahorros que implica la reconversión. Por último, se calcularán las emisiones de dióxido de carbono producidas por ambos refrigerantes.

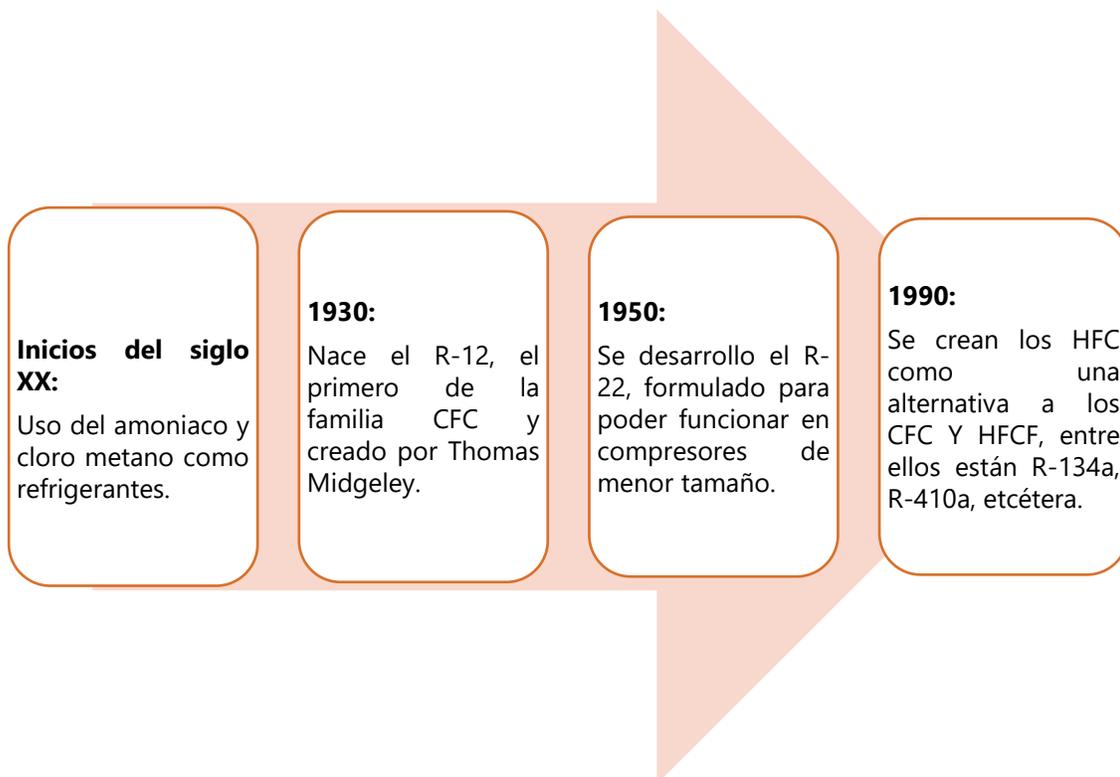
El capítulo II recopila información que ayudará a determinar la importancia de la investigación y, a su vez, lo que se quiere cumplir con ella. El capítulo III reunirá los fundamentos teóricos que ayudan a entender los sistemas y elementos a estudiar. El capítulo IV presentará los instrumentos y metodologías a utilizar. Por último, los capítulos V, VI y VII analizarán los resultados obtenidos y brindarán las correspondientes conclusiones y recomendaciones.

## II. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

En este capítulo se discutirá brevemente los precedentes del problema, analizando sus orígenes y proveyendo información sobre los esfuerzos para solucionarlo. Seguidamente se describe el problema identificado. Así mismo, en la justificación de la investigación se ven argumentos basados en tendencia climáticas y leyes actuales. Posteriormente, se proponen las preguntas de investigación y los objetivos que se quieren cumplir.

### 2.1 PRECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

A finales del siglo 19 empieza una revolución en los sistemas de refrigeración mecánicos con el uso de estos para la medicina y la industria. Uno de los elementos más esenciales para el funcionamiento de estos sistemas son los refrigerantes definidos como cualquier cuerpo o sustancia que funcione como medio de enfriamiento, absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia. Seguidamente, en la ilustración 1, se describe una breve historia de los refrigerantes.



**Ilustración 1 – Línea del tiempo de desarrollo de refrigerantes**

Fuente: Elaboración propia.

Con el rápido desarrollo de los refrigerantes no es sorpresa que para los años 60 la presencia de estos halógenos fuera posible detectarla en la atmósfera. Fue para 1974 que los científicos surgieron con la hipótesis que las emisiones de cloro producidas por estos halógenos podían dañar la atmósfera y ser catastrófica en la destrucción del ozono en la estratosfera. La preocupación reside en que el ozono provee la protección contra la radiación de los rayos ultravioletas, los cuales en exceso pueden resultar tóxicos para el ser humano. Fue hasta 1985 que los científicos de British Antarctic Survey, de acuerdo con Stolarski (1988), establecen que, desde mediados de los 70, habían gases en la estratosfera destruyendo la capa de ozono.

Es en 1987 que se llega a un acuerdo internacional, conocido como el Protocolo de Montreal, donde se propone eliminar hasta un 50% el consumo de los CFC en los siguientes 10 años. Es como comienza, por segunda vez, la búsqueda de un refrigerante ideal. Sin embargo, había una restricción muy clara no podía contener ninguna partícula de cloro. Otra característica que debía poseer era tener una mejor eficiencia y poseer un bajo impacto en el calentamiento global. Es importante mencionar que, aunque han salido muchos nuevos refrigerantes sintéticos al mercado desde esta propuesta, ninguno ha logrado cumplir todos los requisitos propuestos.

Sin embargo, a raíz de esto, nacen los HFC. Es importante mencionar que el problema con esta clase de refrigerantes es, aun no poseyendo un alto coeficiente de potencial de agotamiento de capa de ozono (*ODP*), que hacen un gran daño siendo uno de los grandes contribuyentes al calentamiento global. El *ODP* varía entre 0 y 1, entre más próximo a 0 menor el impacto a la capa de ozono, el *GWP* muestra una escala de como un gas de efecto invernadero contribuye al calentamiento global en un determinado tiempo. En la tabla 1 se brinda información del *ODP* y *GWP* de una gran variedad de refrigerantes, pero es importante mencionar el *TEWI* que es otra medida útil, sin embargo, no se presenta en esta tabla debido a que mide los efectos del *GWP* conjunto con las emisiones de dióxido de carbono producida por la energía gastada por los equipos.

**Tabla 1- ODP Y GWP de refrigerantes**

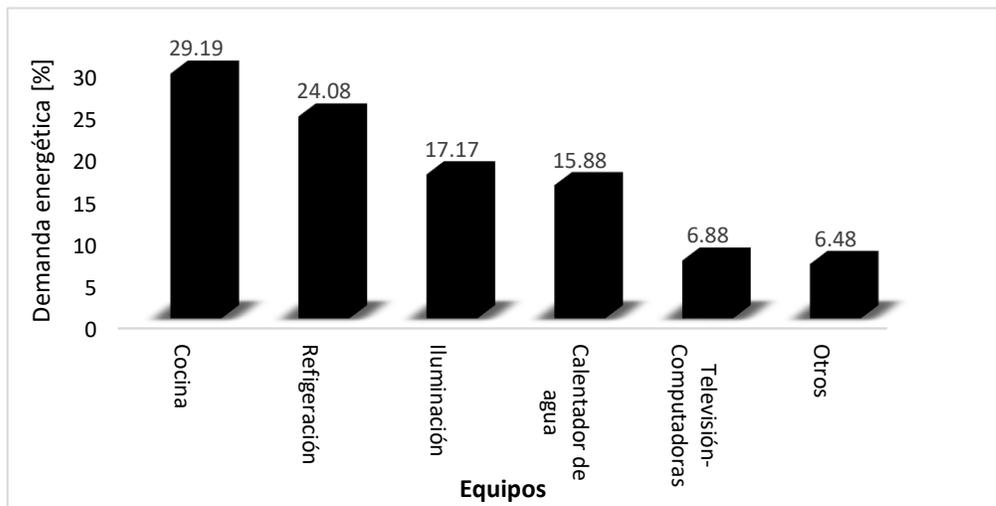
<b>Refrigerante</b>	<b>Tipo</b>	<b>GWP</b>	<b>ODP</b>
R-12	CFC	10900	1
R-502	CFC	4657	0.33
R-22	HCFC	1810	0.055
R-134a	HFC	1430	0
R-404a	HFC	3922	0
R-32	HFC	675	0
R-407a	HFC	2107	0
HC-290	HC	3	0
HC-600a	HC	3	0
R-717	HC	0	0
R-744	HC	1	0

Fuente: Creación propia basada en (Bolaji & Huan, 2013)

Alguno de los logros del Protocolo de Montreal es la prohibición de la producción de los refrigerantes CFC y HCFC, se creó leyes que eliminan el uso de estos en Europa y que también se están implementando en América. Aunque en Europa se ha logrado prácticamente exitosamente el objetivo de este, en otras zonas del mundo se sigue trabajando para el avance de su cometido. En la actualidad, se han unido a estos esfuerzos el Protocolo de Kyoto, creado el 2005, que también busca la eliminación de los gases de efecto invernadero. Cumplirlo ha resultado un desafío pues muchas potencias se niegan a eliminar varias de las sustancias establecidas en el tratado. Los refrigerante HCF están en el cometido de este protocolo. El

Acuerdo de París se firmó en el 2016 con el objetivo de mitigar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, este entra en vigor hasta el año 2020.

Algunas investigaciones experimentales destacadas en el uso de HC como sustitutos es la de Wongwises & Chimres (2005) y Yu & Teng (2014) en donde se adaptan refrigeradoras, que utilizan R-134a, con distintos HC demostrando una mejora en la eficiencia de los equipos. Con base a los resultados del experimento de Park & Jung (2007) en un aire acondicionado, reemplazando el R22 con mezclas de HC con otros refrigerantes, demostró estos como una buena alternativa debido a su adaptabilidad al sistema original. En la actualidad, en países como Alemania se está empezando a fabricar sistemas domésticos que vienen diseñados para utilizar hidrocarburos. Sin embargo, los efectos de las emisiones de estos refrigerantes siguen reflejados en la incidencia de fenómenos naturales alrededor del mundo. A finales del 2019 se registró una de las peores inundaciones en la historia de Venecia, una devastadora temporada de incendios en Australia y en Honduras se vivió una sequía que llevó a la pérdida de cultivos y ganado en zonas pobres del país. Estos fenómenos son producto del calentamiento global, en donde los refrigerantes contemporáneos contribuyen con la producción de *TEWI* debido al uso diario de estos equipos y el consumo energético de los mismos. En Honduras se ve reflejado en el sector residencial en donde dos de los electrodomésticos que consumen más energía son el Aire Acondicionado y la refrigeradora, como se simboliza en la Ilustración 2.



**Ilustración 2- Porcentaje de consumo de energía sector residencial**

Fuente: Creación propia basada en (GIZ, 2016).

## 2.1.2 PRECIO DE ENERGÍA EN HONDURAS

Es importante determinar el comportamiento de los precios de energía en Honduras. En la siguiente tabla se muestran los resultados recopilados de los últimos 5 años.

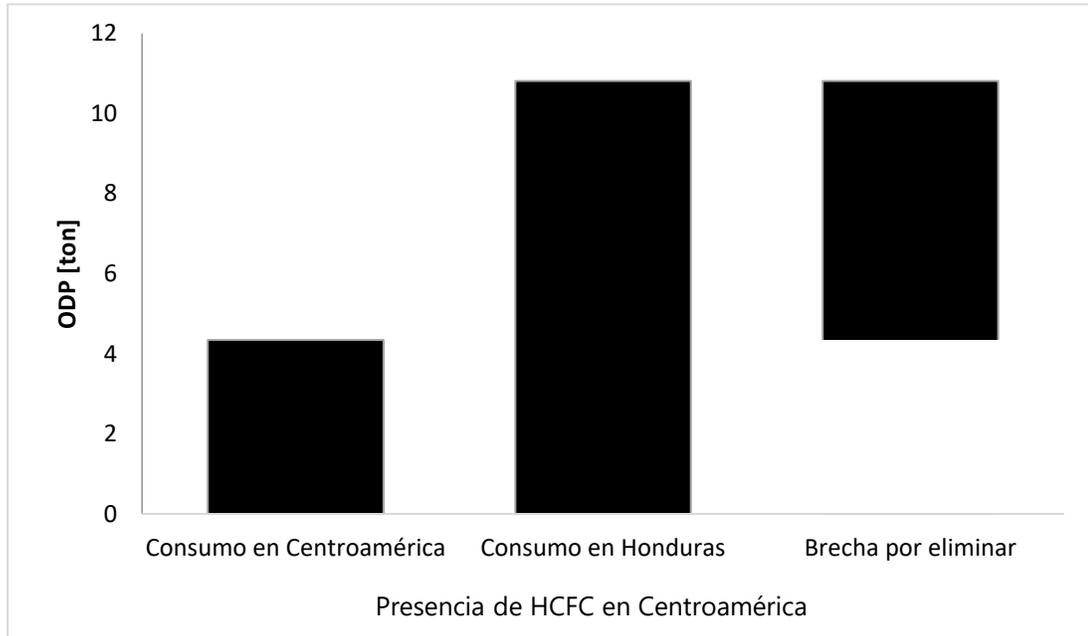
**Tabla 2 – Evolución de precios de energía en Honduras**

Año	Tarifa [\$/kWh]
2016	0.058
2017	0.0644
2018	0.065
2019	0.161
2020	0.135

Fuente: Creación propia basada en («Historial de Tarifas», s. f.).

## 2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Honduras se han establecido leyes y programas para reducir, y como objetivo final eliminar, las emisiones causadas por gases como el R-22, un HCFC. Aun así, muchos hogares y negocios cuentan con unidades de aire acondicionado que siguen contribuyendo con emisiones de este refrigerante, debido a esto la brecha que existe en la presencia de ODP provocados por HCFC en Honduras sigue siendo considerable comparada con otros países de la región como se ve en la ilustración, ya que en países como Guatemala, El Salvador o Costa Rica el compromiso no solo se basa en la eliminación de la exportación de este refrigerante si no que también erradicar el uso para el mantenimiento y servicio a unidades existentes, llevando a menores emisiones de estos refrigerantes. Por lo tanto, se debe implementar refrigerantes de bajo impacto ambiental, como los hidrocarburos, sin modificar muchos elementos del sistema original y manteniendo o mejorando la eficiencia del sistema, consiguiendo de esta manera la eliminación de este tipo de contaminación.

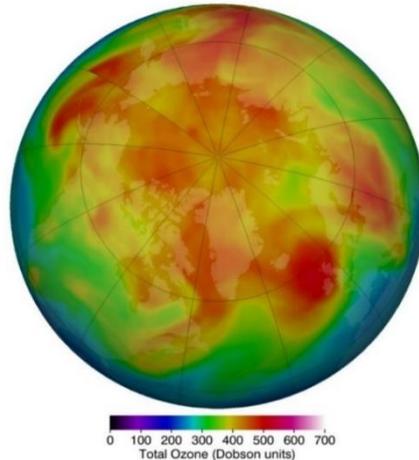


**Ilustración 3- Consumo de HCFC en región**

Fuente: Creación propia basada (UNEP, 2017).

### **2.3 JUSTIFICACIÓN**

De acuerdo con el Reglamento General sobre Uso de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono se establece que en Honduras está prohibido y castigado por la ley, la venta, introducción e instalación de unidades que hagan uso de sustancias que prohíba el Protocolo de Montreal. Se incluye entre estos a los refrigerantes tradicionales debido a que son sustancias con alto *ODP* y *GWP*. Los refrigerantes que se han creado para sustituirlos contribuyen al calentamiento global. Debido a que todavía no se ha eliminado estas sustancias y el lento avance para el cumplimiento del calendario de la eliminación de los mismos, los niveles de ozono sobre la Antártica siguen siendo alarmante como se puede notar en la ilustración, registrando la temperatura más caliente desde 1980 de aproximadamente 16°C. Esto lleva a la incógnita de si será posible la recuperación total del agujero de ozono.



**Ilustración 4 – Nivel de ozono sobre la Antártica**

Fuente: (Gray, 2020).

Es por esto que es importante el estudio de la implementación de los hidrocarburos, que se han identificados como buenos sustitutos para los refrigerantes tradicionales, en equipos de refrigeración que utilizan HCFC y algunos HFC, principalmente en países en donde la presencia de este tipo de refrigerantes está todavía muy vigente, como en Honduras. El R22, un refrigerante HCFC, es uno de los que sigue contribuyendo con emisiones dañinas para el medio ambiente. El R290 se propone como un idóneo sustituto, sin embargo, por la falta de conocimientos para su implementación y temor al uso de este tipo de sustancias en Honduras no se recomienda su implementación. Sin embargo, definir las formas de implementación, beneficios energéticos y costos de implementación es de suma importancia para el avance en esta problemática. Es por eso que esta investigación pretende determinar si existe una relación costo beneficio, tal que la reconversión del refrigerante R22 por R290 en un aire acondicionado suponga un ahorro.

## **2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿En cuánto disminuye el flujo másico del nuevo refrigerante?
2. ¿El trabajo de los componentes mecánicos va a incrementar con el nuevo refrigerante?

3. ¿En qué porcentaje se ve afectado la eficiencia del sistema el uso del nuevo refrigerante?
4. ¿Cuánto será el costo de la reconversión?
5. ¿Cuánto será la inversión para preparar el equipo para la reconversión?
6. ¿Cuánto se podría ahorrar en electricidad con el uso del nuevo refrigerante?

## **2.5 OBJETIVOS**

Son la guía de lo que se pretende conseguir con la investigación que se va a realizar, marcarán el camino a tomar.

### **2.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el costo beneficio, analizando técnica y económicamente, el uso del R290 en sistemas de aire acondicionado creados para R22 aplicando estándares internacionales. Identificando, a su vez, los distintos efectos de la reconversión en todo el sistema.

### **2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Definir los nuevos valores de operación de los componentes mecánicos y la nueva masa del refrigerante.
2. Calcular el costo de la inversión y el ahorro que implicaría el proceso de reconversión.
3. Evaluar los resultados del proceso de reconversión en la eficiencia y el trabajo del sistema.

### III. MARCO TEÓRICO

Los temas discutidos en el siguiente capítulo serán con el objetivo de: Conocer la situación actual de la problemática, seguidamente se discutirá la teoría de sustento y los fundamentos termodinámicos que influyen en ella, la refrigeración mecánica y sus componentes. Se explicará los refrigerantes y su impacto ambiental, se hablará sobre alternativas concentrándose en los hidrocarburos y sus respectivas medidas y terminando con el R290 como sustituto del R22.

#### 3.1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Distintos protocolos se han creado para mitigar el impacto que tuvieron los primeros refrigerantes. El primero fue el Protocolo de Montreal que creó leyes y normativas para la eliminación de los CFC y los HCFC. En el 2016 se actualizó con la enmienda de Kigali, que entró en vigor en 2019, y que demanda una eliminación, en los próximos 30 años, de aproximadamente el 85% de los HFC para evitar el aumento de 0.4°C de la temperatura de la tierra. También se encuentra el Convenio de Viena, Protocolo de Kioto, Acuerdo de París, entre otros, que se han creado en los últimos años con el mismo propósito, sin embargo, el más exitoso de estos, y que ha sido acatado por un gran porcentaje de países, es el Protocolo de Montreal.

El enfoque global está en el uso de los hidrocarburos como sustitutos debido a sus características termodinámicas. Algunos avances relevantes en el uso de estos se han dado en China y en India. Fine (1997) identificó que aproximadamente el 85% de los refrigeradores producidos en China utilizan R600a. Según Monharaj *et al.* (2009) en India no se están produciendo sistemas con hidrocarburos, sin embargo, el número de investigaciones que se está realizando, para comprobar sus cualidades como sustitutos, ha ayudado en el avance del estudio de los mismos. Sarbu (2014) afirma que el uso de hidrocarburos en refrigeradores y sistemas de calefacción se está volviendo común en Alemania y el Reino Unido, también se puede encontrar mezclas de R600a y R290 dominando en el sector de las refrigeradoras, el R290 y R1270 se utilizan principalmente para bombas de calor en Europa. Sin embargo, el interés de las entidades internacionales de refrigeración, como la *AHRI*, es encontrar alternativas para

sustituir los refrigerantes sintéticos en sistemas que vienen de fábrica con estos, algunos trabajos realizados reemplazando el R22 por R290 en sistemas de aires acondicionados son:

1. Park *et al.* (2007) realizó un estudio en una bomba de calor/aire acondicionado para analizar el comportamiento de siete alternativas al R22, el R290 mostró mejor rendimiento.
2. Raj & Lal (2008) estudiaron el comportamiento de la reconversión de un aire acondicionado originalmente con R22 a una mezcla de R600A/R290/R407C y se encontró que la capacidad de refrigeración disminuía en un 4.8-7.4%.
3. Wu *et al.* (2012) realizaron el reemplazo directo de R290 en un aire acondicionado de ventana, que utilizaba R22, donde se cambió el compresor por uno de un desplazamiento mayor y se encontró que hay una mejora en el rendimiento del 10%.

Una característica en común que se encuentra de estas investigaciones es el reemplazo o modificación de componentes al momento de hacer la sustitución directa del refrigerante para obtener el mismo o un mejor rendimiento del sistema de refrigeración.

En América, el avance ha sido un poco más lento, solo México, Argentina y Estados Unidos cuentan con compañías que producen sistemas de refrigeración con hidrocarburos de acuerdo con Andersen & Madhava (2002). En Latinoamérica países como Colombia, Costa Rica y Chile se han resaltado por sus proyectos integrando otros refrigerantes naturales como el dióxido de carbono afirma la PNUD (2017).

Por su parte, Honduras, a través de la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, cuenta el Acuerdo N. 006-2012 que regula el uso de sustancias agotadoras de la capa de ozono. Por medio de la Unidad Técnica de Ozono se implementan todas las medidas y programas para el cumplimiento del Protocolo de Montreal. Algunos de sus avances son talleres de introducción a la sustitución de estos refrigerantes y proyectos realizados en dos de las ciudades más importantes, documentados por la Secretaría de Recursos Naturales Ambiente de Honduras, siendo los más relevantes:

- Hotel Copantl: se reemplazó el refrigerante R-22 por un ECO22 en un sistema de 40 ton. Los resultados que presentó esta reconversión es una disminución del consumo energético del 24.04% y un ahorro en kw consumidos de 1084.56 y monetariamente de Lps. 4316.55
- Serna: dentro de la institución se han realizado métodos de reconversión en unidades demostrando un ahorro energético del 20.39%.

De acuerdo con la PNUD (2017), Honduras ha logrado eliminar 139 toneladas de sustancias agotadoras de ozono. Se registro un consumo de 10.12 toneladas de ODP producidas por el R22, de acuerdo con un informe publicado por UNEP (2017), los cuales se utilizaron para el mantenimiento de aires acondicionados y sistemas de refrigeración.

### **3.2 REFRIGERACIÓN**

La refrigeración es la acción de enfriar, para cumplir con esto se requiere remover calor y descargarlo a alta temperatura. En términos generales se puede definir de la siguiente manera:

La refrigeración se define como la rama de la ciencia que trata con procesos de reducción y conservación de temperaturas de un espacio o material debajo de la temperatura de sus alrededores. Para lograr esto, el calor debe ser removido del cuerpo a refrigerar a otro cuerpo de una temperatura menor al que se quiere refrigerar. (Dossat, 1961, p.71)

Los principios fundamentales para el entendimiento de la refrigeración residen en la física y termodinámica. A continuación, se expondrán los que son relevantes para la investigación.

#### **3.2.1 TERMODINÁMICA EN LA REFRIGERACIÓN**

En términos simples se puede definir la termodinámica como “una ciencia que investiga las relaciones que existen entre las diferentes clases de energía y sus manifestaciones diversas. Las leyes de las termodinámicas rigen la transformación de un tipo de energía a otro”(Castellan, 1988). Según Zemansky & Dittman (1986) el proposito de esta ciencia es estudiar lo que ocurre en el interior de los sistemas, los valores que encontremos los vamos a denominar coordenadas termodinámicas. Los conceptos básicos que influyen en la refrigeración son:

1. Calor: se define como la energía interna de un cuerpo. Un cambio en esta energía se traduce en un cambio en temperatura o en estado, ya sea líquido, sólido o gaseoso. Este se representa como  $Q$  y sus unidades son Joule [J].
2. Entalpía: se refiere a la cantidad de calor que tiene una sustancia a partir de cierto punto. También se puede definir como la suma de las energías internas y el flujo de trabajo. Este se representa como  $h$  y sus unidades son kilo Joule sobre kilogramo [kJ/kg].
3. Entropía: es la energía que no se puede utilizar en el sistema para producir trabajo. Se puede relacionar con la entalpía mediante la segunda ley de la termodinámica debido a que son términos inversamente proporcionales, cuando se tiene la cantidad máxima de entalpía no se tendrá entropía y viceversa. Esta se representa con la letra  $s$  y sus unidades son Joule sobre Kelvin [J/K].
4. Primera ley de la termodinámica: afirma que la energía no se crea ni se destruye. Por lo tanto, se conoce también como el principio de conservación de energía y se puede llegar a la conclusión que cuando en una parte del sistema ocurre un aumento de energía se debe a que hubo una disminución de algún tipo de energía en otra parte. La ecuación 1 describe esta ley cuando no hay reacciones químicas.

$$[\text{Energía que entra}] = [\text{Energía que sale}]$$

### **Ecuación 1 - Conservación de energía**

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

5. Segunda ley de la termodinámica: Por medio de la forma de Clausius "Es imposible que una máquina actuando por sí sola, sin ayuda de un elemento exterior, pueda transportar calor de un cuerpo a otro que tenga mayor temperatura que el primero"(Goríbar, 2009). En resumen, se puede afirmar que no existe la transmisión espontánea de calor entre un objeto caliente a uno helado. Solo si se efectúa un trabajo, por una fuente de energía externa, sobre el sistema podrá haber un intercambio de calor.

6. Transferencia de calor: "La ciencia de transferencia de calor no solo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también, trata de predecir la rapidez a la que se realizara este intercambio bajo condiciones específicas" (Holman, 1999). Este término se aplica con las diferencias de temperaturas que existe en todo el sistema de refrigeración, mientras más grande sea mayor será la rapidez con la que ocurre la transferencia. Según Cengel & Boles (2012) es por medio de la transferencia de calor que los sistemas de refrigeración logran funcionar.

Otros aspectos que afectan a la refrigeración son el calor latente y calor sensible. Según Miller & Miller (2006) se puede definir el calor latente como la cantidad de calor necesario para cambiar el estado de una sustancia. En cambio, el calor sensible solo cambia la temperatura de la sustancia. Ambos son las bases del comportamiento de los refrigerantes.

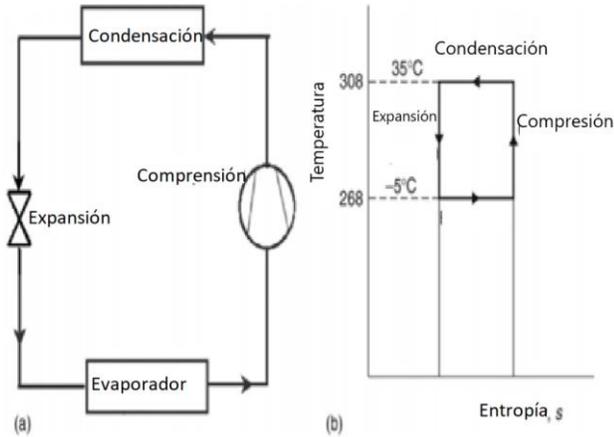
### **3.2.2 CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR**

El ciclo termodinámico por compresión de vapor es el más utilizado en refrigeradoras, sistemas de aire acondicionado y también en calefacción o bombas de calor. Se puede identificar cuatro etapas en este ciclo según Cengel & Boles (2012):

1. "Compresión isentrópica en un compresor". Esto quiere decir que la entropía del refrigerante va a permanecer constante en todo el sistema.
2. "Rechazo de calor a presión constante en un condensador". Se debe tener la consideración que la temperatura de este no se acerque a la zona de saturación.
3. "Estrangulamiento en un dispositivo de expansión". Para poder lograr el efecto de expansión de un gas es recomendable utilizar ya sea un tubo capilar o una válvula de expansión.
4. "Absorción de calor a presión constante en un evaporador". Esto va a comprender hasta la zona de vapor saturado.

En resumen "los procesos de compresión y expansión toman lugar a constante entropía. El aumento y rechazo de calor toma lugar a una temperatura constante. El trabajo se transfiere durante la compresión y rechazado durante la evaporación" (Hundy, 2016). Por lo tanto, las

cantidades netas de trabajo y calor que intervienen en este ciclo van a proporcionar una buena capacidad de enfriamiento a un mínimo trabajo. Esta proporción se conoce como coeficiente de rendimiento o *COP*. Este proceso se grafica en la ilustración 5.

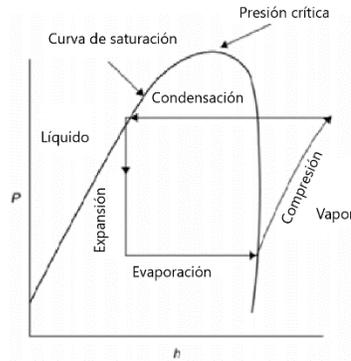


**Ilustración 5-Ciclo ideal de refrigeración: (a) Circuito (b) diagrama T-E.**

Fuente: (Hundy, 2016)

### 3.2.3 GRAFICA PRESIÓN-ENTALPÍA

La grafica presión-entalpía fue creada para estudiar las propiedades de un fluido. Se conoce también como diagrama de Mollier en honor a Richard Mollier quien creó la primera grafica integrando la entalpía. Este diagrama se utiliza para explicar las etapas líquidas y gaseosas de una sustancia. Algunas de las etapas descritas en este diagrama son la curva de saturación, que es la barrera entre una sustancia en estado totalmente líquido o totalmente gas, y la sección de presión crítica, que sirve para determinar un valor que si se sobrepasa el gas no se va a poder condensar. En la ilustración 6 se describen estas etapas. También es una herramienta útil para describir las coordenadas termodinámicas de cualquier refrigerante en un ciclo de refrigeración.



**Ilustración 6-Regiones del Mollier**

Fuente: (Hundy, 2016).

### 3.3 REFRIGERACIÓN MECÁNICA

Como ya se explicó, la refrigeración es el proceso de remover calor donde no se necesita. Este calor es transportado mecánicamente hacia un área donde no afecte al sistema. Dependiendo de la aplicación, ya sea en lo industrial, comercial y doméstico, hay distintas cantidades de calor que rechazar. Un gran ejemplo de esto son los aires acondicionado que rechazan el calor de las personas, paredes, etcétera, hacia el exterior. También se remueve calor de los alimentos para conservarlos y de un cuarto para proveer confort. Este calor se denomina carga térmica. Para lograr esto se integran los componentes mecánicos en un sistema de compresión cuyo propósito es desplazar energía térmica por cada uno de estos en forma de calor. Generalmente, esto se lleva a cabo a través de una sola etapa. Este tipo de sistemas tienen un lado de baja presión y de alta presión. El funcionamiento básico es llevar un refrigerante a través de una serie de componentes y, por medio de sus cambios de estados, extraer calor del sistema.

Un compresor comprime un refrigerante a alta presión y temperatura que venía evaporado a baja presión y temperatura. El refrigerante comprimido se condensa y convierte en líquido cediendo calor latente de condensación a el agua condensada. El refrigerante líquido es estrangulado a un gas de menor presión y temperatura, produciendo el efecto de refrigeración durante la evaporación. (Wang & Lavan, 1999, p. 34)

Por lo tanto, en la refrigeración influyen los componentes mecánicos, que son el compresor, condensador, expansión y el evaporador.

### **3.3.1 COMPRESOR**

El trabajo de un compresor consiste en proveer la energía mecánica para que el ciclo frigorífico pueda comenzar. En la industria se le atribuye una capacidad frigorífica (kW) debido a que es capaz de bombear un flujo de refrigerante que al final va a determinar el estado de la capacidad de refrigeración de el evaporador. Para determinar el funcionamiento de este en un ciclo ideal se realiza por medio del trabajo iséntropico que realiza como se puede ver en la ecuación 2:

$$W_c = h_2 - h_1$$

#### **Ecuación 2 – Calor de compresión**

Fuente: (Baehr, 1987)

Donde:

$h_2 - h_1$  = Caída de entalpías, [kJ/kg].

### **3.3.2 CONDENSADOR**

Es un intercambiador de calor que se encargar de eliminar el calor producido por el compresor y el evaporador. Recibe el refrigerante a alta presión y temperatura y lo comienza a condensar cediendo calor ya sea con aire o con agua. Para poder cambiar de estado se le atribuye una capacidad de calor de rechazo.

$$Q_h = \dot{m} (h_2 - h_3)$$

Fuente: (Gentle et al., 2001)

Donde:

$\dot{m}$  = flujo másico, [kg/s].

$h_2 - h_3$  = Carga específica de calor en la condensación, [kJ/kg].

### 3.3.3 EVAPORADOR

En este intercambiador de calor se evapora el refrigerante absorbiendo la temperatura del ambiente. A esto se le conoce como efecto de enfriamiento y es determinado por la capacidad frigorífica del compresor, acá ocurre el efecto de refrigeración.

$$RE = h1 - h4$$

#### Ecuación 3 – Efecto de refrigeración

Fuente: (Gentle et al., 2001)

Donde:

$h1-h4$  = Entalpías de vaporización, [kJ/kg].

Esto ayuda a determinar la capacidad de extracción de calor del evaporador.

$$Ql = \dot{m}(RE)$$

#### Ecuación 4 – Flujo másico y calor del evaporador

Fuente: (Sarbu & Sebarchievici, 2016)

$Q_l$  = Capacidad frigorífica o calor del evaporador, [kW].

$RE$  = Efecto de refrigeración, [kJ/kg].

### 3.3.4 EXPANSIÓN

Se encarga de suministrar el refrigerante a la velocidad correcta para poder evitar el sobrecalentamiento en el evaporador. Convencionalmente se usaban los tubos capilares, pero las válvulas de expansión termostática han agarrado relevancia en la actualidad, aunque su alto precio posiciona su uso en el área industrial.

### 3.3.5 AIRE ACONDICIONADO

Una de las áreas de aplicación de la refrigeración mecánica son los aire acondicionados, la *ASHRAE* los define como un sistema que cumple cuatro objetivos específicos: controlar la temperatura ambiental, controlar la humedad, controlar la circulación del aire y controlar la calidad del aire. El sistema de vapor por compresión es el que usualmente se usa para

aplicaciones de aire acondicionado en la actualidad. Este ciclo permite transportar calor en la dirección contraria para lograr las diferencias de temperaturas deseadas. Involucra los mismos componentes mecánicos de todos los sistemas de refrigeración que le permiten ya sea añadir o extraer calor. De acuerdo con Kubba (2017), un aspecto que se tiene que tener en cuenta es que los aires acondicionados se tienen que mantener limpios para prevenir el crecimiento de patógenos en los ductos y puede afectar la eficiencia de los mismos.

Para el funcionamiento correcto de los aires acondicionados se tiene que tomar lo siguiente en cuenta:

1. Temperatura de bulbo seco
2. Humedad relativa
3. Radiación térmica
4. Movimiento de aire
5. Nivel de actividad

Las condiciones térmicas las define el usuario, el estándar 55 especifica condiciones aceptables para los lugares dependiendo del nivel de ocupación que exista. Otro aspecto importante en esta aplicación es la carga térmica de los lugares.

### **3.3.6 CARGA TÉRMICA**

Las cargas de la refrigeración vienen de dos fuentes:

1. Enfriar algo, o sea reducir su entalpia.
2. Mantener algo frio, remover calor interno y externo.

Las cargas totales dependerán de dos factores si es sensible o latente. Entre ellos tenemos:

1. Calor de productos.
2. Conducción de calor a través de paredes y techo.
3. Radiación solar a través de ventanas.
4. Calor de fuentes internas, como personas, equipos, iluminación, motores, etcétera.
5. Calor debido a las infiltraciones de aire.

### 3.4 REFRIGERANTES

Los refrigerantes son una sustancia, usualmente un fluido (con compuestos químicos), que se usa en los ciclos de refrigeración para enfriar un espacio. Capturan calor y lo liberan en otro espacio utilizando fenómenos termodinámicos para cambiar de fase, ya sea de gas a líquido y viceversa. (Kubba, 2017, p. 417)

Por lo tanto, es uno de los elementos más esenciales de la refrigeración debido a que tiene que estar absorbiendo y cediendo calor sin alterar sus características. Para Whitman & Johnson (2000), si se quiere conocer las temperaturas y presiones de trabajo de un refrigerante tiene que cumplir una de las siguientes dos condiciones:

1. Estar en un proceso de evaporación o condensación.
2. Estar en equilibrio.

Los refrigerantes se clasifican en las siguientes familias:

1. CFC: tienen un alto contenido de cloro. También poseen moléculas de flúor y carbono. Son gases estables, pero debido a esto permanecen mayor tiempo en la atmosfera produciendo un agotamiento del ozono. Es ilegal su producción desde 1995. Entre estos se encuentran R11, R12, R502, etcétera.
2. HCFC: debido a su composición química, contienen hidrogeno, son menos estables que los CFC. Aun así, por sus partículas de cloro, tienen potencial para dañar la capa de ozono. Todavía se encuentran en el mercado, pero la eliminación de su uso, en países en desarrollo, está prevista para el 2030. Entre estos encontramos: R22, R401a, R123, etcétera.
3. HFC: como no tiene atomos de cloro no hace ningún daño a la capa de ozono. Sin embargo, poseen un alto coeficiente de calentamiento global. Un estudio realizado por Velders et al. (2009) demostró que si no se elimina el uso de estos para el 2050 serían responsables de aproximadamente el 28-43% de las emisiones de dióxido de carbono. Algunos de los más importante encontramos: R410a, R134a y R404a.
4. HC o Hidrocarburos: son de origen natural, tienen un porcentaje de calentamiento global mínimo y zero potencial de agotamiento de la capa de ozono. Entre estos se encuentran R600a, R290 y R1270.

También es importante mencionar el uso de las mezclas azeotrópicas y zeotrópicas, el amoníaco, el agua y el dióxido de carbono como refrigerantes. El amoníaco es un gas altamente tóxico y para poder hacer uso de este las tuberías en el que circula van a tener que ser de cobre. Sin embargo, de acuerdo con Lorentze (1994) no es una sustancia tan tóxica como se le considera, debido a su olor es fácil identificar sus fugas y, si se elige los componentes en el diseño de acuerdo con esto, se puede obtener una mejor eficiencia energética en las plantas industriales que lo utilizan. El dióxido de carbono presenta muchas ventajas como refrigerante entre estas su bajo precio, disponibilidad en todo el mundo, compatibilidad con todos los lubricantes, bajo impacto ambiental, etcétera. Sin embargo, su temperatura crítica lo vuelve un refrigerante difícil de usar en climas cálidos.

### **3.5 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS REFRIGERANTES**

La estructura de los primeros refrigerantes y su gran estabilidad ha producido un gran daño a la capa de ozono. Sus emisiones han contribuido grandemente al calentamiento global.

#### **3.5.1 AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO**

La capa de ozono es esencial para la existencia de vida debido a que filtra los rayos ultravioletas. Debido a su agotamiento más rayos ultravioletas pueden pasar y afectar negativamente a todas las formas de vida. Según la UNEP (2003) los CFC producen aproximadamente el 70% de los químicos que agotan la capa de ozono. Todos los refrigerantes CFC, y el R-22, han demostrado ser dañinos para este elemento esencial de vida. Para medirlo se utiliza el *ODP* que es un valor basado en el R-11, el cual cuenta con un valor de 1.

#### **3.5.2 CALENTAMIENTO GLOBAL**

Los gases de efecto invernadero, producidos por las emisiones de los CFC, HCFC, HFC, dióxido de carbono, entre otros, se quedan atrapados en la atmósfera por grandes cantidades de tiempo cambiando las condiciones atmosféricas erráticamente. Debido a esto la temperatura en la Tierra ha aumentado causando el cambio climático que genera desastres naturales en todo el mundo. De acuerdo con Bolaji & Huan (2013) se pueden identificar dos tipos de calentamiento global. El primero es el que directamente producen las emisiones de estas

sustancias y, según Makhnatch & Khodabandeh (2014), se mide con respecto a la comparación del impacto de estas emisiones en relación con la misma cantidad de emisiones del dióxido de carbono en un determinado periodo de tiempo, se le conoce como *GWP*. El segundo es el que se produce indirectamente debido a la combinación del *GWP* y el dióxido de carbono emitido por el consumo energético de las máquinas que utilizan estas sustancias, a este se le conoce como *TEWI*.

### **3.5.3 REGULACIONES**

A nivel mundial se han creado varios acuerdos para regular estos refrigerantes y otras sustancias dañinas para el medio ambiente. El protocolo de Montreal es el más relevante de estos y se creó para eliminar el uso de todos los refrigerantes tradicionales empezando por el CFC, continuando con el HCFC y en la actualidad, con la enmienda de Kigali, está empezando a regular los HFC. Las emisiones de *GWP* que producen los HFC muestran un crecimiento parecido al que tenían los CFC en los años 80, las proyecciones predicen que a finales del siglo 21 van a ser el doble de dañinos para el medio de ambiente. Para el 2050 se pretende eliminar el uso de los HFC. Los esfuerzos para la eliminación de los refrigerantes originales han sido exitosos principalmente en Europa y en países de Asia como China.

El protocolo de Kyoto es otra de la iniciativa que está comprometida con la lucha contra el cambio climático regulando sustancias como gas metano, óxido nitroso y los HFC, entre otras sustancias dañinas. Muchos países industrializados están en contra de las medidas de este protocolo uno de estos es Estados Unidos que no forman parte de este protocolo.

### **3.6 ALTERNATIVAS EXISTENTES**

Harby (2017) afirma que para que un refrigerante se pueda considerar una buena alternativa tiene que cumplir con las siguientes características: calor específico bajo, volumen específico bajo, baja viscosidad, conductividad térmica alta, también no debería ser tóxico, inflamable y corrosivo, y su impacto ambiental tiene que ser bajo. Debido a todas estas consideraciones todavía no se ha encontrado la alternativa perfecta, pero algunos que se podrían utilizar son los HFC y sus mezclas, sin embargo, son los refrigerantes naturales los que ambientalmente tienen el menor impacto.

### 3.6.1 HIDROCARBUROS COMO REFRIGERANTES

Los hidrocarburos fueron utilizados durante inicios del siglo 20, pero desde 1867 debido a dificultades técnicas y aspectos de seguridad los sustituyeron por el uso de los refrigerantes sintéticos. De acuerdo con Jung *et al.* (1999) los hidrocarburos presentan buenas propiedades termodinámicas en conjunto con propiedades químicas que los hacen energéticamente eficientes. El interés en estos refrigerantes es que presentan todas las características para ser sustitutos de los refrigerantes sintéticos, excepto una su inflamabilidad. Algunos hidrocarburos que encontramos en el mercado son R290, R600, R600a, R170 y R1270.

### 3.6.2 INFLAMABILIDAD Y CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

“Los límites de inflamabilidad se definen como el rango de concentración en el cual una sustancia puede explotar o incendiarse cuando se expone a una fuente de ignición” (Smeth *et al.*, 1999). La *ASHRAE* clasifica los refrigerantes en dos categorías de inflamabilidad A o B y estos a su vez pueden ser nivel 1, 2 y 3. Los hidrocarburos se clasifican en inflamabilidad A3, lo que los identifica como propensos a incendiarse. Los grupos de seguridad se representan en la siguiente ilustración:

El diagrama muestra una matriz de seguridad con 'INFLAMABILIDAD' en el eje vertical y 'TOXICIDAD' en el eje horizontal. Las categorías de inflamabilidad son: 'Inflamabilidad alta', 'Inflamables', 'Inflamabilidad baja' y 'No propaga llama'. Las categorías de toxicidad son: 'Toxicidad baja' y 'Toxicidad alta'. Las combinaciones resultan en los grupos de seguridad A3, B3, A2, B2, A2L, B2L, A1, B1.

INFLAMABILIDAD ↑	Inflamabilidad alta	A3	B3
	Inflamables	A2	B2
	Inflamabilidad baja	A2L	B2L
	No propaga llama	A1	B1
		Toxicidad baja	Toxicidad alta
		TOXICIDAD →	

**Ilustración 7 – Grupos de seguridad**

Fuente: Creación propia basada en Estándar 34.

Sin embargo, si se implementan correctamente pueden ser seguros de usar. El estudio de Coulbourne & Suen (2015) demuestra que los riesgos de incendios estos son más bajos de lo pensando y en los aires acondicionados ocurre con menor frecuencia que en refrigeradoras. Las

precauciones de seguridad se deben de tomar de acuerdo con la carga másica, cambios de diseño en el sistema y el lugar de instalación de la unidad. Harby (2017) propone las siguientes medidas de seguridad:

1. Ubicar el hidrocarburo en un sistema sellado.
2. Limitar la carga másica del hidrocarburo.
3. Utilizar una fuente de ventilación para minimizar la concentración del hidrocarburo en el ambiente manteniéndolo así debajo del límite de inflamabilidad.
4. Eliminar las fuentes de ignición que puede haber en el sistema.

### **3.6.3 FUENTES DE IGNICIÓN**

Para el uso seguro de hidrocarburos como sustitutos es esencial identificar los tipos de fuentes de ignición en el sistema de refrigeración. Por lo tanto, algunos elementos que pueden funcionar como fuentes de ignición son los siguientes:

1. Superficies calientes.
2. Chispas en los elementos eléctricos.
3. Una llama, ya sea externa o interna al sistema.
4. Electricidad estática.
5. Equipos mecánicos.

De estos los elementos eléctricos y mecánicos del sistema que se identifican como posibles fuentes de ignición:

1. Contactores.
2. Relés.
3. Motor del ventilador
4. Calentador de descongelamiento
5. Variador de velocidad del ventilador
6. Capacitor de arranque

Verificar el funcionamiento correcto de estos, evitar que produzca vibraciones y asegurarse que estén en buen estado permite el funcionamiento seguro de los refrigerantes en

estos sistemas. A su vez se identifica los elementos mecánicos que podrían actuar como fuentes de ignición:

1. Electricidad estática de las uniones
2. Chispas producidas por la fricción de distintos metales

Se aconseja eliminar todas las uniones mecánicas y reemplazarlas por soldaduras o uniones por presión.

### **3.6.4 CARGA PERMISIBLE**

Generalmente su aplicación se limita a equipos que ocupan una masa menor a 0.15 kg de acuerdo con los estándares de refrigeración, sin embargo, un estudio realizado por Granryd (2000) determina que si el refrigerante se encuentra en un área que tenga su sistema ventilado no hay limitaciones para el uso de estos. Aún así, es importante tener en cuenta la carga permisible de los sistemas debido a que si hay una fuga no provocaría daños al lugar donde se encuentra, de acuerdo con el estandar europeo EN 378-1 se calcula de la siguiente manera:

$$M_{max} = 2.5 * LFL^{\frac{5}{4}} * h_0 * \sqrt{A}$$

#### **Ecuación 5 – Carga permisible en HC**

Fuente: (Kataoka et al., 2000)

Donde:

LFL = Limite de inflamabilidad inferior de masa, [kg/m<sup>3</sup>].

h<sub>0</sub> = Altura de la habitación, m.

A= Área de la habitación, m<sup>2</sup>.

De acuerdo con Harby (2017) y (Cheng et al., 2014) se puede llegar a la conclusión que para el remplazo de CFC y HCFC se puede considerar usar solo un 40-55% de HC.

### **3.7 R290 COMO SUSTITUTO DEL R22**

La aplicación del R22 es más común en aires acondicionados. Sus características lo hacen ideal para aplicaciones de alta y media temperatura. Es un refrigerante muy estable y es

compatible con aceites minerales y POE. No es tóxico y en caso de que haya una fuga, al ser un gas menos liviano que el aire, se va directamente al suelo. Debido a su impacto ambiental negativo eliminar el uso de este está previsto para el 2030. Una de las alternativas, de acuerdo con Godwin (1994) en un estudio realizado para la *AREP*, que presenta más aceptación de los hidrocarburos es el R290 (Propano) debido a sus propiedades termodinámicas y el hecho de que es compatible con los mismos lubricantes.

### 3.7.1 PROPIEDADES FÍSICAS

El calor latente de evaporación del R290 es más alto que el del R22 lo que determina que requiere menos masa para funcionar. De acuerdo con Choudhari & Sapali (2017) como los puntos de ebullición son parecidos las curvas de presión y áreas de aplicación van a ser similares lo que lo convierte en un buen sustituto. La tabla expone todas las propiedades de los dos refrigerantes.

**Tabla 3-Propiedades físicas del R22 vs R290**

Refrigerantes	Peso molecular [kg/Kmol]	Punto de ebullición normal [°C]	Temperatura crítica [°C]	Presión crítica [MPa]	Calor latente de evaporación [kJ/kg]
<b>R22</b>	86.47	-40.75	96.2	4.99	233.7
<b>R290</b>	44.10	-42.2	96.7	4.25	425.4

Fuente: Creación propia basada en (Choudhari & Sapali, 2017).

### 3.7.2 CARACTERÍSTICAS DE SEGURIDAD

Una de las preocupaciones al utilizar el R290 es su grado de inflamabilidad. La ASHRAE, en el estándar 34, clasifica el R290 como una refrigerante clase A3, esto quiere decir que no es tóxico, pero es inflamable. Algunas consideraciones que se debe tener es sellar bien los sistemas, carga mínima y buena ventilación. Principalmente se tiene que eliminar todas las fuentes de ignición. De acuerdo con el estándar 15 de la *ASHRAE* se debe de tener en cuenta que si se presentan fugas la concentración del R290 no debe superar más del 20% de su límite de inflamabilidad inferior. Colbourne & Suen (2015) evaluó la inflamabilidad del R290 y R600a

en y determino que el uso del R290 en aire acondicionados era seguro, Zhang *et al.* (2016) determinaron que para que ocurriera una explosión por el refrigerante tendría que haber una sobrepresión de 820 Pa, pero aun así no provoca grandes daños a la unidad y Tang *et al.* (2018) determino que en el caso de ocurra una fuga en el sistema van a influir tres aspectos importantes:

1. La masa del refrigerante en el sistema, evitar usar estos refrigerantes en sistemas que necesiten grandes masas.
2. El diámetro del agujero donde se produce la fuga.
3. La ventilación del área donde se encuentra el sistema de refrigeración.

En la siguiente tabla se presenta las propiedades de inflamabilidad, siendo una de las más relevantes el calor de combustión debido a que hace referencia a la energía que libera el refrigerante cuando se está quemando y entra en contacto con el aire.

**Tabla 4-Propiedades de seguridad del R290**

<b>Límite de inflamabilidad inferior por masa [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Límite de inflamabilidad inferior por volumen [%]</b>	<b>Calor de combustión [kJ/kg]</b>	<b>Temperatura de ignición [°C]</b>	<b>Toxicidad [ppm]</b>	<b>Velocidad de combustión [m/s]</b>
0.039	2.1	50500	466	1000	0.4

Fuente: Creación propia basada en (Choudhari & Sapali, 2017)

### **3.7.3 RENDIMIENTO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

De acuerdo con experimentaciones, recopiladas por Yang & Wu (2013), se pudo comprobar que el uso de este refrigerante ayuda a mejorar el rendimiento del sistema, disminuir el consumo de energía y presiones de descarga. Zhou & Zhang (2010) compararon el rendimiento de sistemas con R290 y encontraron que es 8.5% más eficiente energéticamente que el R22, pero su capacidad de enfriamiento es menor. Devotta *et al.* (2005) realizo mediciones, en una sustitución de R22 por R290 en un aire acondicionado, en tres tipos de condiciones diferentes de humedad y temperatura y en todas ellas el COP del R290 fue mayor

en un rango de 2.8-7.9 % y el consumo energetico fue menor en un rango de 12.4-13.5%. Por lo tanto, para determinar la eficiencia y rendimiento hay cuatro tipo de factores importantes:

1. **Potencia eléctrica:** de acuerdo con la segunda ley de la termodinamica para poder funcionar los sistemas de aires acondicionado ocupan una fuerza externa que les permita extraer calor y esta fuerza trabaja por medio de la electricidad. La potencia necesaria para llevar a cabo la compresión isentropica se calcula de la siguiente manera:

$$P = \dot{m} \times W$$

**Ecuación 6 – Potencia eléctrica**

Fuente: (Sarbu & Sebarchievici, 2016)

Donde:

$\dot{m}$  = flujo másico, [kg/s].

W= trabajo del compresor, [W].

2. **COP:** en los aires acondicionado es una medida que ayuda a determinar la cantidad de calor que le toma extraer a un sistema y la energía que consume para proveer calefacción, se calcula de la siguiente manera:

$$COP = \frac{E_t}{P}$$

**Ecuación 7 – COP**

Fuente: (Sarbu & Sebarchievici, 2016)

Donde:

$E_t$  = Carga térmica, [W].

P= Potencia eléctrica, [W].

3. **EER:** se utiliza para medir la eficiencia con la que un aire acondicionado enfría un espacio, se calcula de la siguiente manera:

$$EER = 3.4141 \times COP$$

**Ecuación 8-Eficiencia energética**

Fuente: (Sarbu & Sebarchievici, 2016)

Donde:

COP = Coeficiente de rendimiento

3.4141 = Factor de conversión de Watts a Btu/h.

4. Relación de compresión: permite determinar la eficiencia del compresor en el sistema, para calcular se hace de la siguiente manera:

$$RC = \frac{P_{alta}}{P_{baja}}$$

#### Ecuación 9 – Relación de compresión

Fuente: (Baehr, 1987)

Donde:

$P_{alta}$  = Presión de descarga, [kPa].

$P_{baja}$  = Presión de succión, [kPa].

### 3.7.4 IMPACTO AMBIENTAL

Un factor importante para seleccionar el R290 como sustituto es su bajo impacto ambiental debido a su origen natural. El R290 no presenta *ODP* y un bajo coeficiente de *GWP*. Por sus características de eficiencia energética se podría determinar que presenta un *TEWI* menor que el R22. En la tabla se presentan las propiedades ambientales del R22 y R290.

**Tabla 5-Impacto ambiental R22 vs R290**

Refrigerante	Presencia atmosférica en años	<i>GWP</i>	<i>ODP</i>
<b>R22</b>	12	1810	0.055
<b>R290</b>	0.041	3	0

Fuente: Creación propia basada en (Choudhari & Sapali, 2017)

### 3.8 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para determinar los beneficios de un proyecto es esencial realizar un análisis económico de lo que implica y los riesgos que conlleva.

### 3.8.1 COSTO-BENEFICIO

El costo beneficio se describe como una metodología que evalúa la relación que existe entre los costos que tomara realizar un proyecto y los beneficios que le traerá a quien lo realice, en otras palabras, es una relación entre ingresos y egresos. Generalmente se utiliza para analizar las ventajas y desventajas antes de realizar un proyecto y se calcula de la siguiente manera:

$$CB = \frac{\text{Ingresos (Beneficios)}}{\text{Egresos (Costos o inversión)}}$$

#### **Ecuación 10 – Costos Beneficios**

Fuente: Elaboración propia basada en (Court Monteverde et al., 2009).

Por motivos de la investigación se estableció las siguientes variables:

Ingresos: Gasto del Aire Acondicionado [HNL].

Egresos: Gasto de la reconversión [HNL].

De acuerdo con Court Monteverde et al. (2009) tenemos los siguientes parámetros de evaluación:

1.  $B/C > 1$ : implica que realizar este proyecto es aconsejable y beneficioso.
2.  $B/C = 1$ : realizar el proyecto será indiferente, o sea ni va a afectar negativamente, pero tampoco traerá mucha ganancia.
3.  $B/C < 1$ : realizar el proyecto no sería aconsejable.

### 3.8.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Es una metodología que se utiliza para determinar el comportamiento de una variable dependiente bajo un conjunto de suposiciones, esto para ver la manera en la que la influncian el valor del proyecto. Esto facilita la toma de decisiones sobre si un proyecto conviene realizarlo o no.

## **IV. METODOLOGÍA**

El siguiente capítulo se concentrará en discutir las características metodológicas usadas en la investigación. Comenzando con el enfoque, seguidamente se determinan las variables dependientes e independientes, la hipótesis, se detallará la metodología utilizada con su respectivo alcance y por último se presentará el cronograma de actividades.

### **4.1 ENFOQUE**

El enfoque determina el sentido de la investigación que va a ser llevada a cabo y está determinado por la metodología de estudio. En la investigación se aplica un enfoque cuantitativo debido a que las variables a medir serán cuantificables. Se establece este tipo de enfoque debido a que "utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías" (Sampieri et al., 2014).

Por lo tanto, el análisis que se realizará será basado en valores numéricos que se obtienen de fórmulas establecidas para la descripción de los sistemas de aire acondicionado ideales. Esto permitirá establecer los valores de operación del sistema con el nuevo refrigerante. A su vez, se hará el mismo análisis para obtener los datos del sistema original. Y de esta manera se podrá realizar el estudio del contraste entre los dos refrigerantes y determinar los beneficios.

### **4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN**

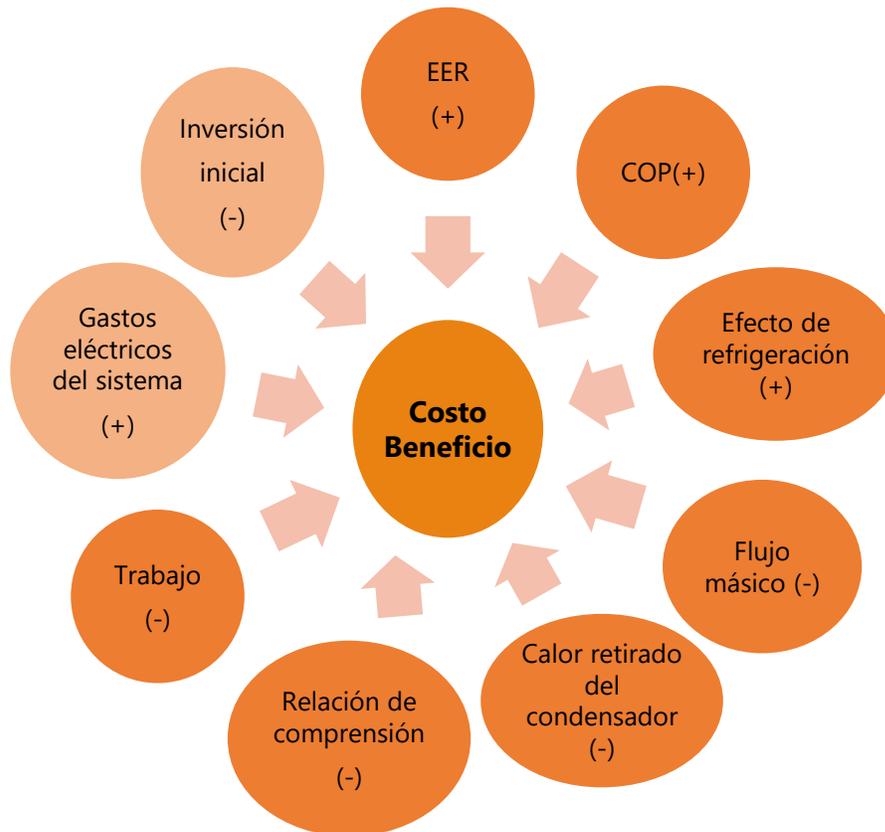
Identificar correctamente las variables de investigación son de suma importancia debido a que van a permitir medir y evaluar resultados.

#### **4.2.1 VARIABLES DEPENDIENTES**

La variable dependiente es la que varía según las variables independientes vayan cambiando. Para la investigación se consideró el costo beneficio debido a que determina la viabilidad de la implementación.

#### 4.2.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

Son las variables que controlan el comportamiento y resultado de la variable dependiente. Se identificaron dos tipos de variables independiente: técnicas y económicas, que se detallan en la siguiente ilustración:



**Ilustración 8 – Variables de la investigación**

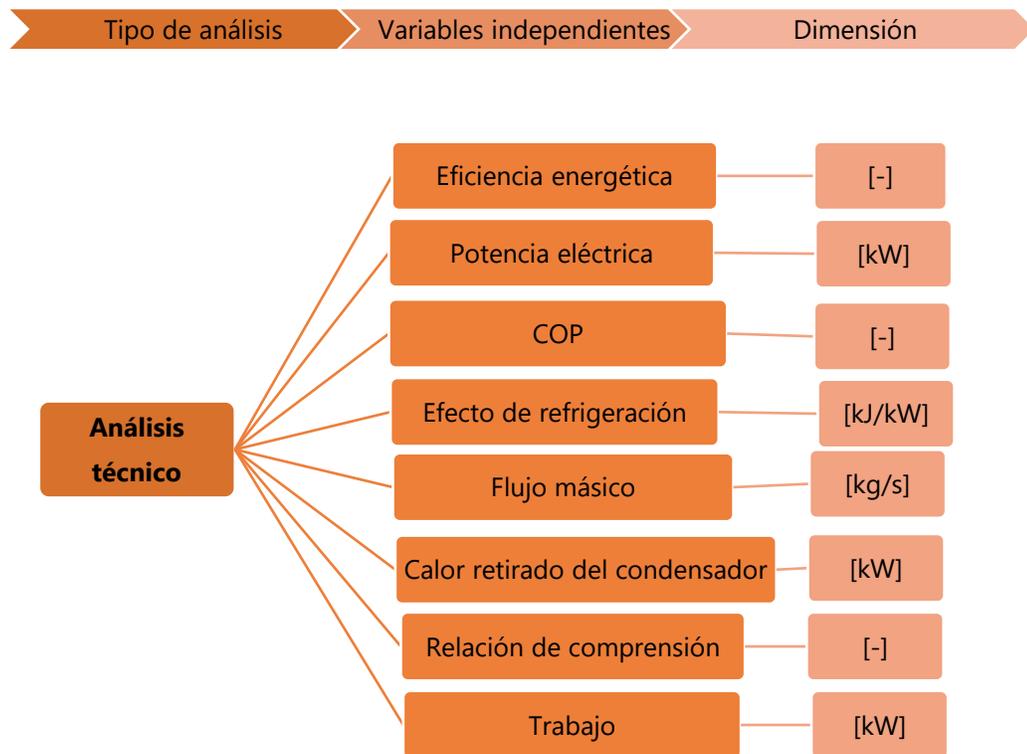
Fuente: Creación propia.

Las variables independientes técnicas de la investigación son las siguientes:

1. Eficiencia energética: cantidad de energía que se gasta para remover calor de un sistema y proveer en
2. *COP*: coeficiente de rendimiento, de acuerdo con la ASHRAE en los aires acondicionados se utiliza para medir la calefacción, pero por su relación con la EER es importante calcularla.
3. Potencia eléctrica: consumo energético requerida para la compresión isentrópica.

4. Efecto de refrigeración: es la cantidad de calor que absorbe el refrigerante para producir el efecto de enfriamiento, es importante debido a que entre mayor es más eficiente se considera el sistema.
5. Calor retirado del evaporador o capacidad frigorífica: variación del flujo de la masa de refrigerante en el sistema.
6. Calor retirado del condensador: calor que se cede para condensar el refrigerante.
7. Relación de compresión: sirve para indicar el rendimiento mecánico del compresor.
8. Trabajo del compresor isentrópico: trabajo que requiere realizar un compresor para comprimir el refrigerante en un ciclo ideal.

Por consiguiente, las variables de investigación de aspecto técnico se ejemplifican en la siguiente ilustración.



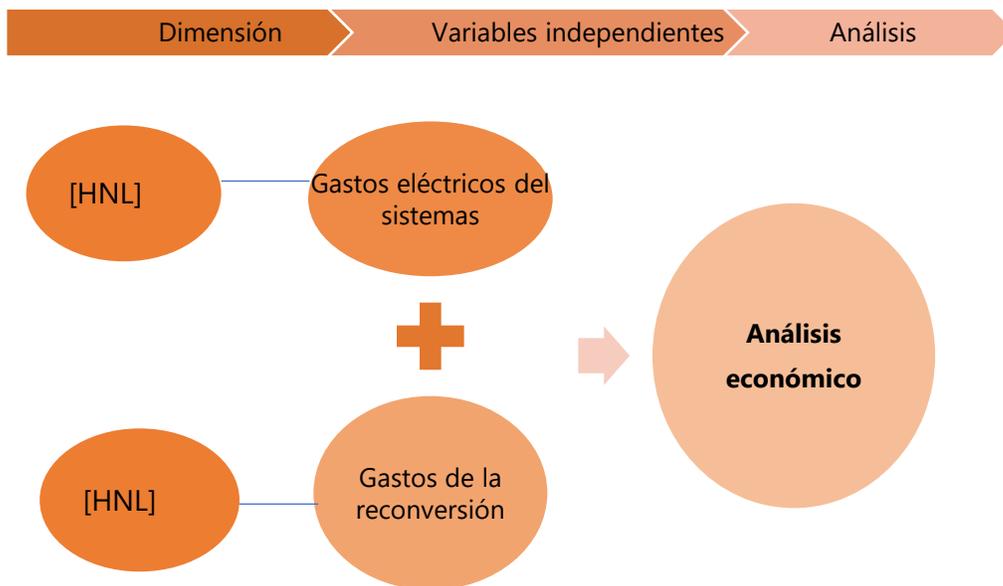
**Ilustración 9-Variables dependientes e independientes**

Fuente: Creación propia.

Para el análisis económico se evalúan las siguientes variables:

1. Gasto del aire acondicionado: es la diferencia del consumo energético para ambos refrigerantes donde se calcula el producto de la potencia del sistema y la tarifa actual de energía.
2. Gasto de la reconversión: es la inversión inicial, se contempla todos los gastos relacionados con los procedimientos que se van a tener que llevar a cabo para el uso del R290.

En la ilustración se grafica las variables económicas que influyen en el estudio económico.



**Ilustración 10 – Variables económicas**

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 HIPÓTESIS

Una hipótesis es esencial para determinar, con fundamento teórico, los resultados que se esperan del estudio, por lo tanto, de acuerdo con los datos recolectados de las investigaciones estudiadas en el marco teórico se va a establecer la hipótesis de investigación.

### 4.3.1 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Con la implementación del refrigerante R290 se obtendrá una mejora en la eficiencia y, por lo tanto, se producirá un ahorro en el consumo energético, dando como resultado un costo beneficio mayor a 1 haciéndolo viable en las tres dimensiones de estudio.

### 4.3.2 HIPÓTESIS NULA

Con la implementación del refrigerante R290 no se obtendrá una mejora en la eficiencia y, por lo tanto, no se producirá un ahorro en el consumo energético, dando como resultado un costo beneficio menor a 1 haciéndolo no viable en las tres dimensiones de estudio.

### 4.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Para la realización de la investigación fue necesario apoyarse en distintas técnicas e instrumentos que serán detallados a continuación:

1. Diagrama de Mollier: permite graficar un refrigerante en determinadas presiones o temperaturas para así encontrar las entalpías que sirve para describir la cantidad de calor que absorbe en su recorrido por el ciclo.
2. *Engineering Equation Solver(EES)*: "Es un programa diseñado para resolver ecuaciones lineares, no lineares y diferenciales. Una de sus ventajas es su base de datos para procesos termodinámicos" (*EES: Engineering Equation Solver | F-Chart Software: Engineering Software*, s. f.).
3. *Danfoss CoolSelector*: "Está diseñado para proveer una interfaz que permita correr cálculos basados en un conjunto de condiciones iniciales de operación- capacidad de refrigeración, refrigerante, temperaturas de evaporación y condensación- y así seleccionar el mejor componente para su diseño" (*Coolselector® 2 Exercises*, s. f.).
4. *CoolPack*: "Colección de modelos simulados para sistemas de refrigeración y cada uno tiene un objetivo específico, ejemplo análisis de ciclo, dimensionamiento de componentes, análisis de energía y optimización" (*CoolPack*, s. f.).
5. *Microsoft Office Excel*: herramienta que en el estudio servirá para almacenar conjunto de datos y graficarlos.

## 4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

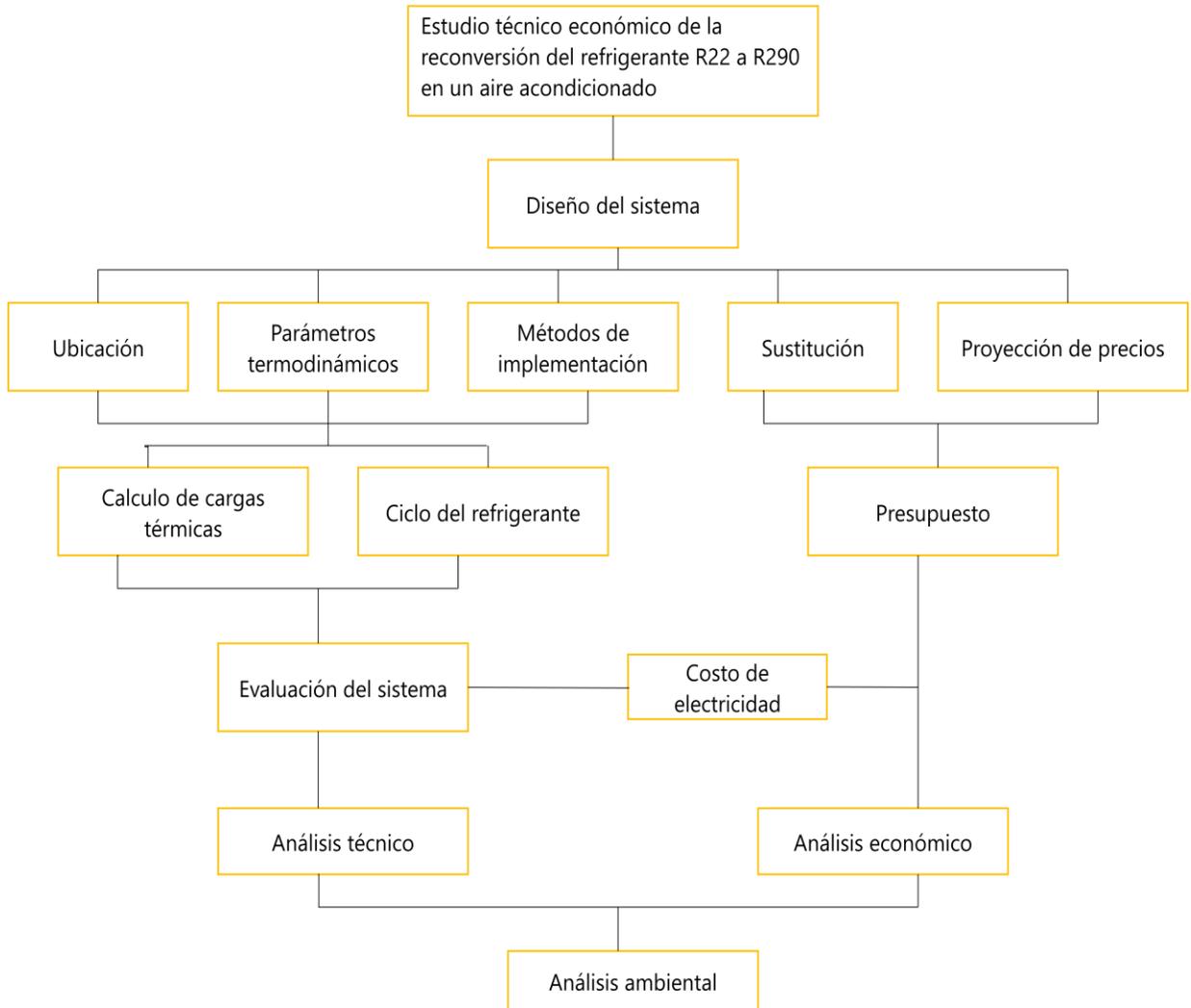
Debido a que la metodología de estudio hace referencia a los procedimientos para alcanzar los objetivos iniciales es necesario definir el alcance y el diseño de la investigación, que se grafica en la ilustración:



**Ilustración 11 – Metodología de investigación**

Fuente: Creación propia basada en (Sampieri et al., 2014).

Por lo tanto, debido al enfoque y alcance de la investigación se van a recolectar datos que permitirá describir los sistemas a estudiar y de esta manera analizar los posibles beneficios que traerá la implementación del nuevo refrigerante. La metodología, basada en el diseño transaccional, en donde primero se elegirá el área donde se va a trabajar, cantidad de personas que la habitan y el tipo de aire acondicionado a utilizarse. Seguidamente, por medio de CoolPack se analizará las cargas térmicas y los parámetros termodinámicos de los refrigerantes. Con estos valores se procederá a crear una interfaz en EES que va a permitir analizar todos los componentes por medio de las fórmulas previamente establecidas. Una vez analizado el sistema mecánico se determinó la inversión que se llevará a cabo para realizar la reconversión y el gasto de la electricidad del sistema. Con esto se calcula el costo beneficio del proyecto. Por último, se identifica las emisiones de dióxido de carbono de ambos refrigerantes. Todo eso se grafica en la siguiente en ilustración:

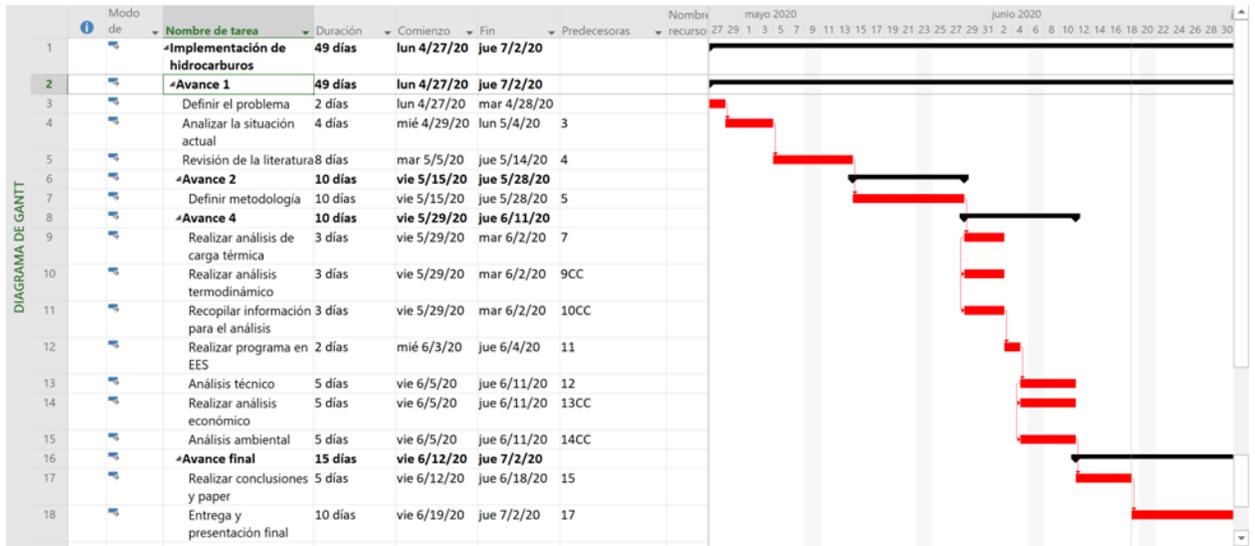


**Ilustración 12 – Estrategia de investigación**

Fuente: Creación propia.

#### **4.6 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**

Seguidamente se muestra las actividades que se llevaron a cabo en la investigación, desde la definición del problema hasta la entrega de los resultados. Abarcando un periodo de 10 semanas empezando el 27 de abril hasta el 3 de julio, en la siguiente ilustración se muestra el diagrama realizado en el programa *Project*.



**Ilustración 13 – Cronograma de actividades**

Fuente: Creación propia.

## **V. ANÁLISIS Y RESULTADOS**

Este capítulo contiene información sobre el modelo termodinámico utilizado para estudiar el problema de investigación y el análisis de resultados técnicos, económicos y ambientales que ayudan a determinar los beneficios del proyecto.

### **5.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS**

En esta sección se detallarán todos los aspectos que permiten la evaluación técnica y económico de la investigación, la determinación de estos parámetros sirve para obtener resultados más cercanos a la realidad. Por lo tanto, primero se tiene que elegir una localización donde será desarrollado el estudio. Seguidamente, se creará un diseño termodinámico que, por la naturaleza no experimental de la investigación, simplificará y facilitará el desarrollo de la investigación. También se listan algunos procesos que se llevaran a cabo para poder preparar el equipo para la implementación del nuevo refrigerante. Por último, se realiza una proyección financiera que permite analizar el costo beneficio del proyecto en un periodo de 5 años.

#### **5.1.1 LOCALIZACIÓN**

En el estudio se determina una oficina pequeña en San Pedro Sula con dimensiones estándares de 2.4x2.65x3 m, construida de concreto con su respectiva transmitancia de 1.7 W/°C·K. Para las fuentes internas se considera la presencia de 2 persona, 2 lámparas y otros equipos como computadoras y motores.

#### **5.1.2 DISEÑO TERMODINÁMICO**

Un diseño termodinámico fue desarrollado para poder obtener los resultados de operación del aire acondicionado, en el cual se considera lo siguiente:

1. Trabaja en condiciones ideal.
2. Se considera un aire acondicionado con una capacidad de 1TR y una masa de 450g de refrigerante.
3. Se determinó una presión para el lado de baja de 33.4 kPa y para el lado de alta de 120.24 kPa, debido a que funciona idealmente.

4. Se encuentra una temperatura en el evaporador de 4°C y en el condensador de 49°C, esto por medio de la tabla P-T del refrigerante R22.
5. El aire acondicionado funciona en régimen estacionario, por lo tanto, cantidades netas de energía, ya sea potencial o cinética, no se toman en cuenta en el análisis del sistema.
6. La compresión es isentrópica.

### **5.1.3 MÉTODO DE IMPLEMENTACIÓN**

Es esencial mantener las condiciones de funcionamiento, o mejorarlas, cuando se hace uso del nuevo refrigerante. Por lo tanto se va estudiar implementarlo de dos maneras:

1. Manteniendo la misma capacidad frigorífica, ya que esta manera no se perderá potencia frigorífica en el sistema y los intercambiadores de calor no se verán afectados.

2. Utilizando el 50% del flujo original para así calcular el flujo del R290, esto haciendo uso de los descubrimientos de las investigaciones previamente discutidas en la sección 3.6.4.

Esto permitirá seguidamente elegir la manera más eficiente que provea condiciones adecuadas para cumplir con la demanda térmica del sistema.

### **5.1.4 SUSTITUCIÓN DEL REFRIGERANTE ORIGINAL**

Un aspecto importante por determinar son los procesos se realizan para poder implementar el nuevo refrigerante, para esto se consultan los distintos estándares de seguridad entre ellos el estándar 15 de la *ASHRAE*. Primero se van a identificar las posibles fuentes de ignición en el aire acondicionado, previamente detalladas en la sección 3.6.2 del marco teórico. Es importante tener en cuenta que se tiene que cumplir con las normativas de seguridad internacional como el estándar IEC 60079, por lo tanto, todos los componentes eléctricos mencionados tienen que ir aislados en cajas herméticas. Para que evitar descargas, es recomendado usar conectores de paleta en todas las conexiones y mangas suaves para aislar los cables. También hay que eliminar todas las uniones mecánicas del sistema y volver a soldar los elementos que en refrigeración, que se hace por medio de varillas de plata, una alternativa a este procedimiento sería utilizar *lokring*, sin embargo, son muy costosos. Debido a la naturaleza del tubo capilar se determina que si el refrigerante cambia lo mejor es reemplazar este también,

por consiguiente, el filtro deshidratador que va conectado a este se tendría que cambiar también.

Aislado todos los componentes eléctricos y sustituyendo el tubo capilar, el siguiente paso sería extraer el refrigerante R22 del sistema, para esto se tiene que realizar un vacío y un barrido con nitrógeno. Este procedimiento es estándar para la extracción de cualquier refrigerante. Seguidamente se hará un análisis de fugas que es de suma importancia debido a la inflamabilidad de los hidrocarburos, usualmente esto se hace con detectores dependiendo del refrigerante. Con el sistema ya listo se procede a cargar el sistema.

Identificando todos los procesos que se llevarían a cabo para la reconversión se es capaz en el análisis económico dar un estimado de la inversión para la realización del proyecto.

### 5.1.5 PROYECCIÓN FINANCIERA

Debido que se va a estar realizando un análisis de costo beneficio a cinco años, es necesario proyectar el precio de la energía para poder obtener un resultado del costo de la electricidad cercano a la realidad. Para esto se graficó los valores detallados en la sección 2.1.2 y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\text{Precio} = 1^{-190} * e^{0.2172t}$$

**Ecuación 11 – Precio de energía**

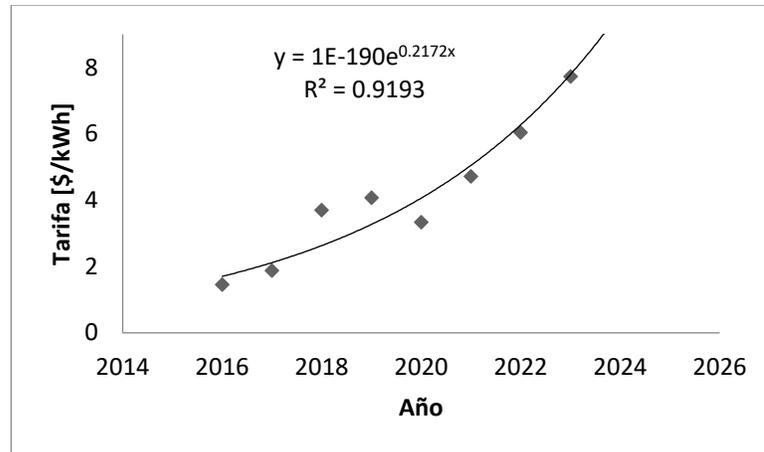
Fuente: Creación propia.

**Tabla 6 – Proyección precio de electricidad**

<b>Año</b>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<b>Precio [\$]</b>	0.079	0.1036	0.1347	0.175	0.2275

Fuente: Creación propia.

La ecuación anterior se encontró por medio de la regresión exponencial, esta describe el comportamiento de los precios en Honduras y permite conocer la tendencia de crecimiento de los mismo, esto se demuestra en la siguiente gráfica.



**Ilustración 14 – Precio de la electricidad**

Fuente: Creación propia.

## 5.2 RECOLECCIÓN DE DATOS

Para poder caracterizar el ciclo de ambos refrigerantes es esencial primero conocer las cargas del sistema las entalpías de los refrigerantes, presiones de los refrigerantes y la capacidad de refrigeración. Todos estos valores servirán como *inputs* al momento de la realización de la interfaz del *EES*.

### 5.2.1 CÁLCULO DE CARGA PERMISIBLE

Un aspecto importante por determinar es la carga permisible del sistema, debido a que la nueva carga de refrigerante tiene que estar muy por debajo de la calculada para que en el caso de una fuga no sea fatal para los que están en el lugar. Por lo tanto, hay que tener 2 factores presentes: la habitación en la que se va a instalar el equipo y el hidrocarburo que se va a instalar. Con la formula previamente detallada, en la sección 3.6.4, se procede a hacer el cálculo de los datos:

$$M_{max} = 2.5 * 0.038^{\frac{5}{4}} * 3 * \sqrt{6.35}$$

Donde:

0.038: límite de inflamabilidad inferior del R290 en términos de masa.

3: altura de la oficina.

6.35: área de la oficina.

Por medio de esta fórmula se encuentra que 317.08 g es la carga permisible del sistema, dato relevante al momento de encontrar el nuevo flujo másico debido a que por medio de esto se determina si es viable el uso del nuevo refrigerante en el área que se definió.

## 5.2.2 TUBO CAPILAR

Como se discutió previamente, un elemento que se tenía que modificar es el tubo capilar para que logre funcionar con las nuevas condiciones del sistema. Para este se hizo uso de la herramienta de Danfoss que permite calcular las dimensiones de los tubos capilares. Como resultado la nueva longitud será de 3.48 m.

## 5.2.3 CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS

El modelaje de las cargas térmicas del sistema se hizo tomando en cuenta lo establecido en la sección de localización. Primero se consultó el estándar 55 de la ASHRAE que ayuda a determinar las condiciones térmicas y de humedad del lugar de instalación. Para mantener una temperatura interna de 22°C se necesita una humedad relativa del 50%, de acuerdo con el estándar, esto permite mantener el confort humano. También influye la temperatura externa que para San Pedro Sula es de 30°C, datos tomados de (WMO, s. f.), que según el estándar equivale a una humedad relativa del 80%. Para una oficina el factor de renovación de aire será de 6 de acuerdo con el estándar 62.1-2013 de la ASHRAE. Con todo esto definido se procede a calcular las cargas térmicas.

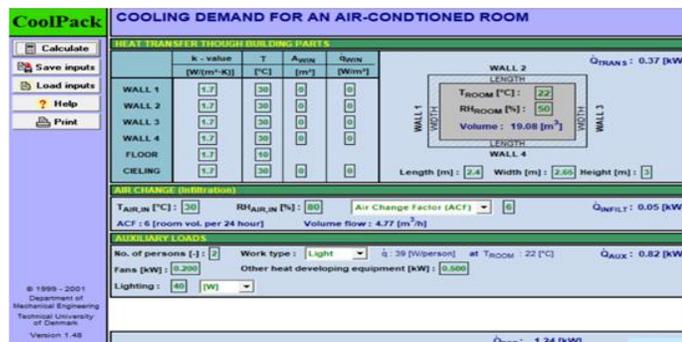


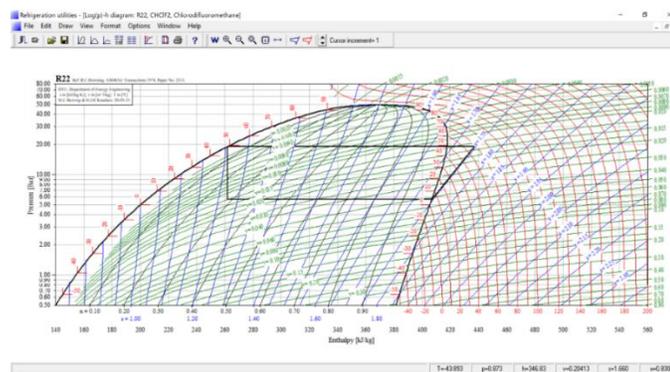
Ilustración 15 – Análisis de carga térmica

Fuente: Creación propia.

Por lo tanto, el aire acondicionado tendrá que ser capaz de extraer una carga térmica de 1.24 kW, esto se verá reflejada en la potencia térmica que tiene que extraer el sistema.

## 5.2.4 CICLO R22

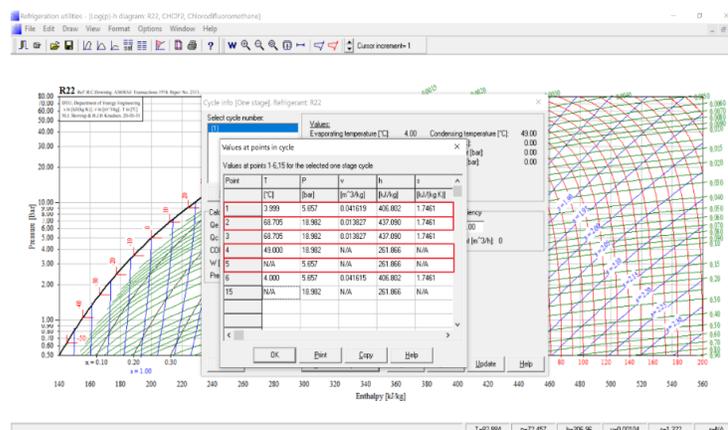
Un elemento esencial para la recolección de datos del ciclo de ideal de refrigeración es el comportamiento de refrigerante bajo los parámetros de operación establecidos previamente. Por lo tanto, se utilizó el software *CoolPack*, se seleccionó debido a que utiliza datos de la *ASHRAE*, y se procedió a analizar el diagrama de Mollier del R22, como se ve en la ilustración.



**Ilustración 16 – Mollier R22**

Fuente: Creación propia.

Con el ciclo simulado se procedió a encontrar las coordenadas termodinámicas del refrigerante que serán útiles para la creación del programa en EES, en la ilustración se marcan en rojo las que corresponden al ciclo ideal de donde se utilizara en cuenta los datos de entalpía.

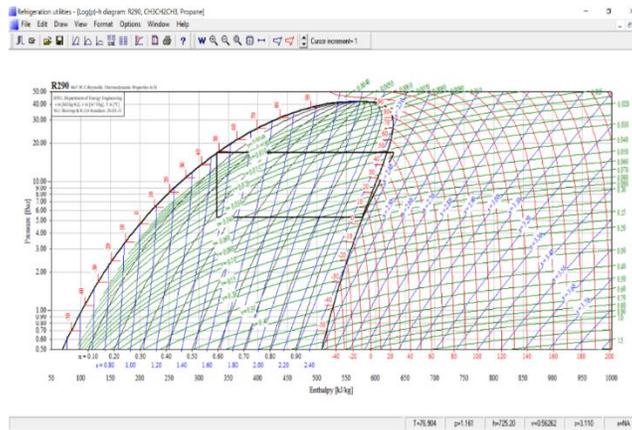


**Ilustración 17 – Ciclo R22**

Fuente: Creación propia.

## 5.2.5 CICLO R290

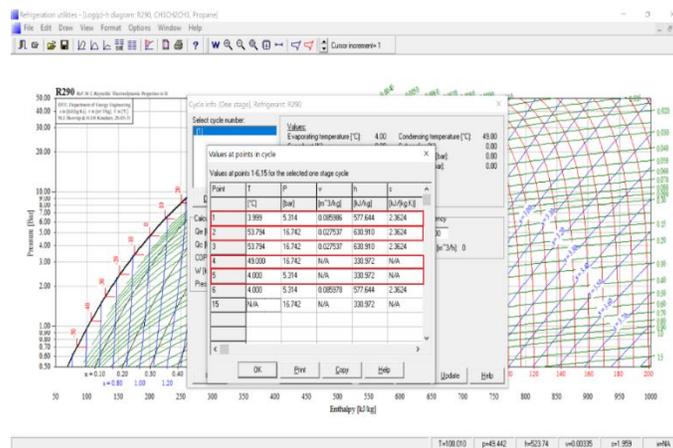
Se procedió a realizar el mismo análisis para el R290, tomando en cuenta un aspecto fundamental que para que el aire acondicionado funcione óptimamente el refrigerante tiene que ser capaz de funcionar bajo las mismas condiciones de presiones y temperatura, por lo tanto, establecido se utilizó los mismos parámetros de operación, en la ilustración se muestra el ciclo del nuevo refrigerante.



**Ilustración 18 – Mollier R290**

Fuente: Creación propia.

Con esto establecido se recolecto los datos de las coordenadas termodinámicas del refrigerante que se muestran en la ilustración remarcados en rojo.



**Ilustración 19 – Ciclo R290**

Fuente: Creación propia.

### 5.2.6 ELABORACIÓN DEL PROGRAMA

Para la obtención de resultados del ciclo mecánico se utilizó el software *Engineering Equation Solver* debido a que cuenta con una base de datos que permite el uso de propiedades termo físicas de sustancias químicas.

Para poder solucionar las ecuaciones primero se le programo las temperaturas de alta y baja y cargas térmicas debido a que son datos que, por motivo de estudio, se mantienen para ambos refrigerantes. Seguidamente se puede ingresar las entalpías, encontradas previamente en el *CoolPack*, dependiendo del refrigerante que se va a modelar y calcular los resultados. Con esto definido se procede a recolectar los resultados del sistema funcionando con el R22.

### 5.3 ANÁLISIS TÉCNICO

Con la evaluación de los ciclos de ambos refrigerantes, se procedió a comparar los resultados para el refrigerante original y el sustituto, esto se visualiza en la siguiente tabla.

**Tabla 7 – Resultados**

<b>Propiedades</b>	<b>R22</b>	<b>R290</b>	<b>R290 (50%)</b>
<b>Capacidad frigorífica [kW]</b>	4.146	4.146	3.5251
<b>Flujo másico [kg/s]</b>	0.02859	0.0168	0.01429
<b>Efecto de refrigeración [kJ/kg]</b>	145	246.6	246.6
<b>Trabajo de compresor [kW]</b>	30.3	53.3	53.3
<b>Potencia [kW]</b>	0.866	0.8959	0.7619
<b>Trabajo condensador [kW]</b>	5.012	5.042	4.287
<b>Razón de compresión [-]</b>	3.048	2.86	2.86
<b>COP [-]</b>	1.65	1.59	1.87
<b>EER [-]</b>	5.788	5.5926	6.38

Fuente: Creación propia.

### 5.3.1 CAPACIDAD FRIGORÍFICA

Como se discutió previamente se propuso la implementación del refrigerante manteniendo la capacidad frigorífica, por lo tanto, en el primer caso el R290 no varía con respecto al R22, sin embargo, para la segunda propuesta disminuye en un 15%, como se ve en la ilustración.

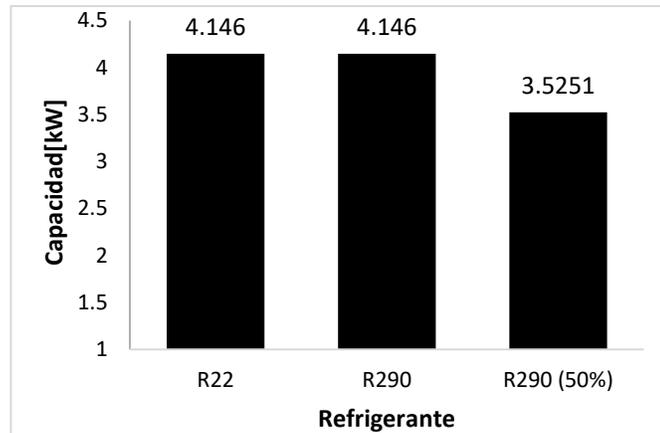


Ilustración 20 – Capacidad frigorífica

Fuente: Creación propia.

### 5.3.2 FLUJO MÁSIKO

En la ilustración se percibe una disminución del 58% en el flujo del R290 para la primera propuesta y de 50% para el segundo caso, esto era de esperarse debido a que la baja densidad de los hidrocarburos implica menor masa.

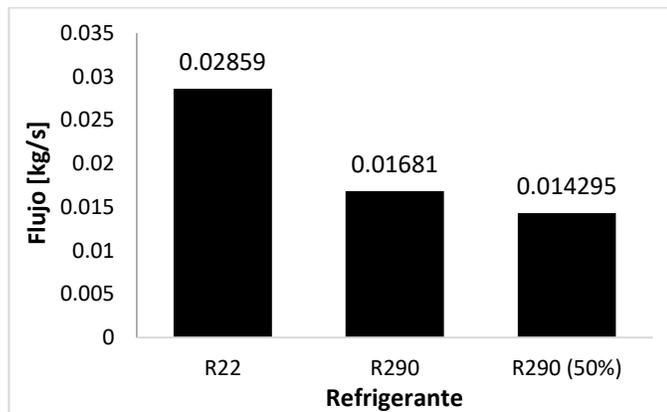
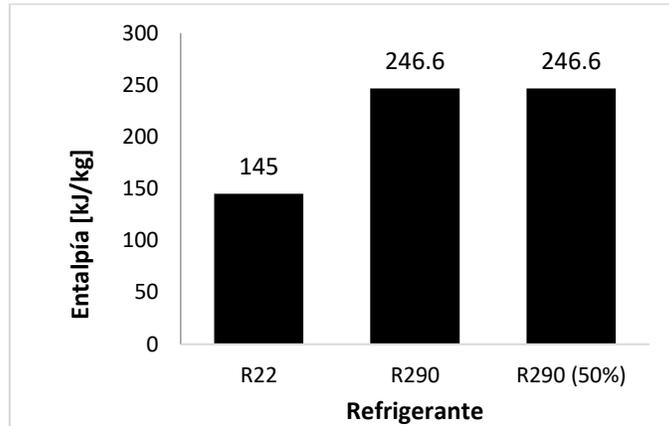


Ilustración 21– Flujo másico

Fuente: Creación propia.

### 5.3.3 EFECTO DE REFRIGERANTE

Debido a que el efecto de refrigerante depende de las entalpías se mantiene constante para las dos evaluaciones y, como se ve en la ilustración, es mayor para el refrigerante R290 lo que implica que este sistema tendrá mayor capacidad de absorción de calor que el original.

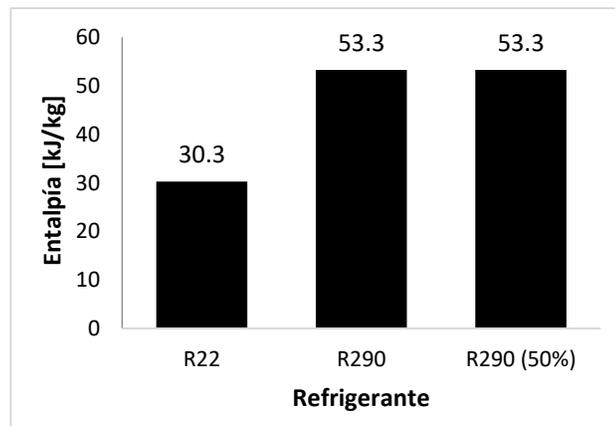


**Ilustración 22- Efecto refrigerante**

Fuente: Creación propia.

### 5.3.4 TRABAJO DE COMPRESOR

Debido a que el compresor del sistema trabaja forma isentrópica, se calculó el calor de compresión, que es el calor agregado al refrigerante al momento del trabajo del compresor, para el R290 sufre un aumento, esto se ve reflejado en un sobrecalentamiento para poder comprimir el nuevo refrigerante.



**Ilustración 23- Trabajo de compresor**

Fuente: Creación propia.

### 5.3.5 POTENCIA

En el primer caso la potencia que le va a tomar al sistema para funcionar óptimamente aumenta ligeramente, una de las razones reside en que para mantener la misma capacidad frigorífica le supone al sistema mayor esfuerzo. Sin embargo, para el segundo caso hay un ahorro energético del 12%, esto es debido a que el flujo másico afecta directamente a la potencia del sistema y que el esfuerzo de los componentes mecánicos disminuye considerablemente.

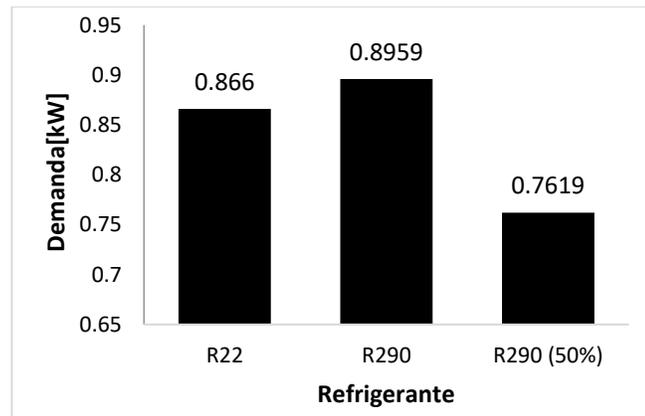
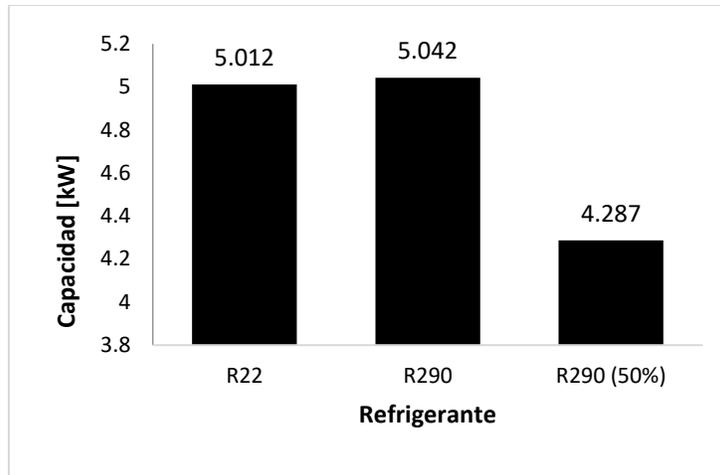


Ilustración 24 – Potencia

Fuente: Creación propia.

### 5.3.6 CALOR DE CONDENSADOR

El trabajo del condensador viene dado por la cantidad de calor que tiene que rechazar, como se ve en la ilustración, para trabajar con la primera propuesta el condensador funcionara exactamente igual que con el R22. Sin embargo, la capacidad del condensador se ve afectada con la segunda propuesta disminuyendo su rendimiento en un 15%. Esto se explica debido a que los intercambiadores del sistema trabajan en conjunto, por lo tanto, los resultados proporcionados en la capacidad frigorífica afectan directamente a este componente.

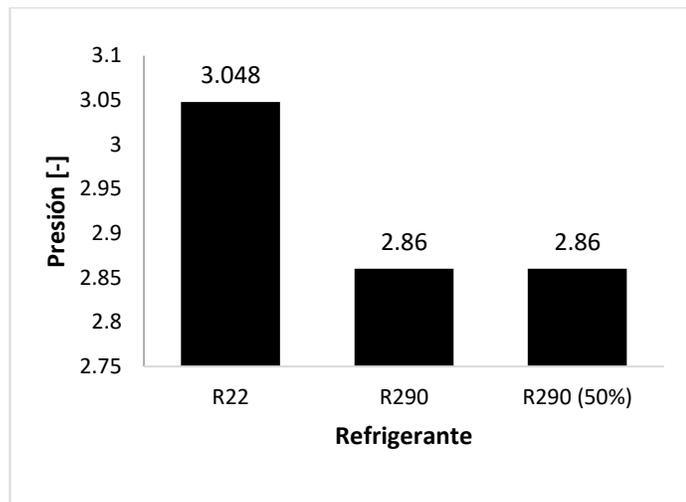


**Ilustración 25 – Calor de rechazo**

Fuente: Creación propia.

### 5.3.7 RELACIÓN DE COMPRESIÓN

En la ilustración se muestra que con el R290 el sistema tendrá una mejor eficiencia mecánica en el compresor. Esto se debe debido a que las presiones de descargas para el sistema son menores con el nuevo refrigerante. Lo que determina mayor estabilidad del refrigerante.



**Ilustración 26 – Relación de compresión**

Fuente: Creación propia.

### 5.3.8 COEFICIENTE DE RENDIMIENTO

El rendimiento del sistema con el R290 se ve afectada en un 13.3 % manteniendo la misma capacidad frigorífica para el nuevo refrigerante. Cuando se baja la carga másica el rendimiento aumenta en un 13%. Esto está relacionado con el consumo eléctrico del sistema.

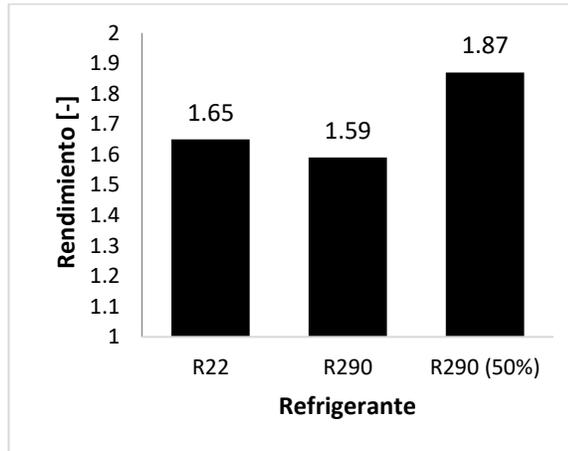


Ilustración 27 – Coeficiente de rendimiento

Fuente: Creación propia.

### 5.3.9 EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para medir la eficiencia energética está directamente relacionado con el COP del sistema, por lo tanto, utilizando una menor más aumenta la eficiencia del sistema.

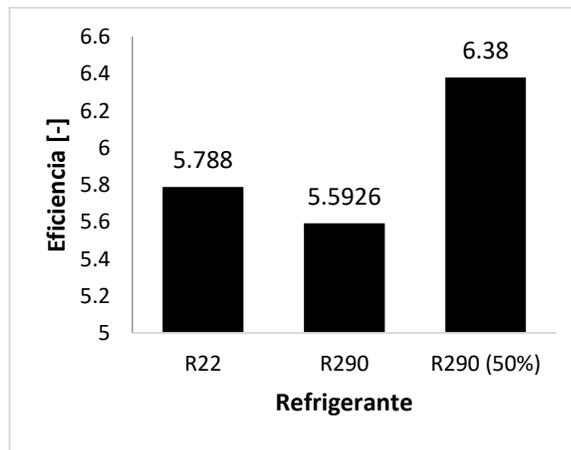


Ilustración 28 – Eficiencia energética

Fuente: Creación propia.

## 5.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para realizar el análisis económico se va a tener que tomar en cuenta tanto la inversión como el consumo eléctrico del sistema.

### 5.4.1 COSTO DE LA RECONVERSIÓN

En la inversión que será llevada a cabo se tomó en cuenta que en el análisis técnico ningún componente demostró la necesidad de ser reemplazado y el proceso de reconversión previamente detallado. De esta manera, se contemplaron la compra de los siguientes materiales:

**Tabla 8 – Presupuesto de la reconversión**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Subtotal</b>
Cajas herméticas	4	\$0.424	\$1.696
Filtro deshidratador	1	\$7.6	\$7.6
Tubo Capilar	1	\$3.6	\$3.6
Refrigerante R290	1	\$7.2	\$7.2
Conectores para cables	50	\$0.2	\$10
Varillas de plata al 15%	3	\$3.8	\$11.4
Cilindro de nitrógeno	0.5	\$52.0	\$26.0
Extintor	1	\$60.0	\$60.0
		<b>Sub Total</b>	<b>\$127.5</b>

<b>Mano de obra</b>	<b>Días</b>	<b>Precio</b>
Ingeniería	2	\$80.0
	<b>Sub Total</b>	<b>\$80.0</b>
	<b>Total</b>	<b>\$207.5</b>

Fuente: Creación propia.

De esta manera con la compra de los materiales necesarios, invirtiendo en un extintor para seguridad e identificando la mano de obra para este tipo de procedimiento se llegó a un costo total de L5,487.4. Hay que tener en cuenta que si el aire acondicionado no está en buen estado se va a tener que invertir en materiales nuevos para que el sistema pueda usar el hidrocarburo.

#### 5.4.2 COSTO DE ELECTRICIDAD

Para hacer el análisis del consumo eléctrico se va a calcular con los datos del sistema más eficiente que de acuerdo al análisis técnico fue el segundo caso propuesto. Las potencias a evaluar serían de 0.7619 kW cuando trabaja con el R290 y de 0.866 kW cuando se hace uso del R22. Ya con esto definido se evalúa en el periodo previamente propuesto, un uso diario de 8 horas y el valor de electricidad según el año que se analiza, como resultado se obtiene las siguientes tablas para ambos refrigerantes:

**Tabla 9 – Gasto en electricidad anual para R22**

Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
\$199.26	\$258.94	\$336.82	\$437.97	\$568.45
			Sub Total	<b>\$1801.44</b>

Fuente: Creación propia.

**Tabla 10 – Gasto en electricidad anual para R290**

Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
\$175.31	\$227.81	\$296.33	\$385.326	\$502.81
			Sub Total	<b>\$1587.6</b>

Fuente: Creación propia.

Seguidamente, se encuentra la diferencia entre ambos valores, que es de **\$213.84** , esto se identifica como una ganancia monetaria.

### 5.4.3 COSTO BENEFICIO

Con el costo de la reconversión y el gasto monetario calculado se va a proceder analizar si el proyecto es viable económicamente.

$$CB = \frac{\$213.84}{\$207.5} = 1.03$$

#### Ecuación 12 – Costo Beneficio del proceso

Fuente: Creación propia.

De esta manera se encontró un valor ligeramente mayor a 1 haciendo de este un proyecto no tan beneficioso económicamente, mucha de esto tiene que ver con que no se puede hacer un proyección mayor a 5 años debido a la corta vida útil de los aires acondicionados residenciales.

### 5.4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para poder obtener un mejor análisis económico se procede a realizar un análisis de sensibilidad con los valores de costo beneficios presentados en la siguiente tabla.

**Tabla 11- Análisis de sensibilidad**

		<b>Ahorros</b>				
		177	197	213.84	230	250
<b>Inversión</b>	<b>1.03055422</b>					
	167	1.05988024	1.17964072	1.28047904	1.37724551	1.49700599
	187	0.94652406	1.05347594	1.14352941	1.22994652	1.3368984
	207.5	0.85301205	0.94939759	1.03055422	1.10843373	1.20481928
	220	0.80454545	0.89545455	0.972	1.04545455	1.13636364
	240	0.7375	0.82083333	0.891	0.95833333	1.04166667

Fuente: Creación propia.

El siguiente análisis demuestra que solo en el 40% de los casos trae el proyecto buenos beneficios lo que lo hace de alto riesgo económicamente, si es a menor escala.

## 5.5 ANÁLISIS AMBIENTAL

Un aspecto esencial de la investigación es determinar los beneficios ambientales que traerá el uso del nuevo refrigerante. Por consiguiente, se procederá a medir los TEWI producidos por ambos refrigerantes:

$$TEWI_{R22} = (0.45 * 0.7 * 5 * 1810) + (0.866 * 5 * 0.45) = 2852.69$$

### **Ecuación 13 – Impacto de calentamiento global R22**

Fuente: Creación propia.

Donde:

7%: razón de fugas.

0.450 kg: masa definida para el R22.

7%: razón de fugas.

5: años analizados.

1810: GWP del R22.

0.45: emisión estándar de dióxido de carbono.

$$TEWI_{R290} = (0.225 * 0.7 * 5 * 3) + (0.761 * 5 * 0.45) = 4.074$$

### **Ecuación 14 – Impacto calentamiento global R290**

Fuente: Creación propia.

Donde:

0.225 kg: masa calculada para el R290.

7%: razón de fugas.

5: años analizados.

3: GWP del R290.

0.45: emisión estándar de dióxido de carbono.

Las emisiones producidas por el consumo de energía que contribuyen al calentamiento global son significativamente menores en el R290, este era un resultado que se esperaba debido al bajo impacto ambiental que posee este refrigerante.

## VI. CONCLUSIONES

El objetivo de la investigación era estudiar el efecto de sustituir un refrigerante HCFC por un HC en un sistema de aire acondicionado y de esta manera obtener el costo beneficio del procedimiento, con base a esto se pudo obtener las siguientes conclusiones:

1. Se rechaza la hipótesis nula, debido a que a implementación de nuevo refrigerante logró mejorar la eficiencia del sistema. Así mismo, aunque se obtuvo un costo beneficio mayor a 1 se considera que es un proyecto de alto riesgo económico debido a que solo en el 40% de los casos trae buenos beneficios económicos y por la corta vida útil del sistema que se esta modificando.
2. Se logró determinar los parámetros de operación del nuevo sistema por medio del estudio termodinámico de los componentes, entre ellos una nueva capacidad frigorífica y trabajo del condensador que disminuían en un 13%, un mayor efecto de refrigerante, una potencia menor en un 12%, entre otros, lo que determina que en general los componentes mecánicos funcionan en el mismo rango que en el sistema original.
3. Se identificó el precio de la inversión a realizar para implementar el hidrocarburo en un sistema de aire acondicionado, que es de \$203.5. También se calculo el costo de la electricidad y se encontró que utilizar el hidrocarburo supondría un ahorro para el usuario de \$213.84.
4. Al proponer los dos casos de investigación, se logró encontrar la manera más eficiente de implementar el hidrocarburo, que fue utilizar el 50% del flujo original para el hidrocarburo, debido a que se es capaz de extraer la cantidad de calor que exige el sistemas con una menor potencia de operación.
5. Se encontró que el sistemas disminuye las emisiones de dióxido de carbono en un 141% comparado con el sistema original.

## VII. RECOMENDACIONES

Se consideraron las siguientes recomendaciones que ayudarían a obtener mejores resultados en la investigación:

- Se recomienda realizar la implementación del hidrocarburo R290 a un aire acondicionado debido a que mejora el rendimiento del sistema a su vez produciendo ahorros para el usuario.
- Hacer modificaciones a el compresor para de esta manera obtener una mejor eficiencia sin sacrificar el rendimiento del sistema y poder mantener la capacidad frigorífica del sistema.
- Se recomienda tener en cuenta los años de uso y el estado del equipo ya que esto puede afectar en gran medida el costo beneficio del proyecto que en general es de alto riesgo económico.
- Se recomienda realizar la reconversión de los sistemas de manera segura por ejemplo hacer pruebas en una cámara psicométrica o con la ayuda de un experto en el tema.
- Una vez implementado el refrigerante se tiene que identificar correspondientemente el sistema para hacer saber a cualquier experto que hace uso de hidrocarburos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andersen, S., & Madhava, S. (2002). *Protecting the Ozone Layer: The United Nations History* (2da ed.). Earthscan Publications.
- Baehr, H. D. (1987). *Tratado moderno de termodinámica: (Teoría y aplicaciones técnicas)*. Tecnilibro.
- Bolaji, B., & Huan, Z. (2013). Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerants—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.008>
- Castellan, G. (1988). *Físicoquímica* (2da ed.). Pearson.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (6ta ed.). McGraw-Hill.
- Cheng, S., Wang, S., & Liu, Z. (2014). Cycle performance of alternative refrigerants for domestic air-conditioning system based on a small finned tube heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 64(1-2), 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.022>
- Choudhari, C., & Sapali, S. (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, D., & Suen, K. O. (2015). Comparative evaluation of risk of a split air conditioner and refrigerator using hydrocarbon refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 59, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.06.026>

CoolPack. (s. f.). IPU. Recuperado 21 de junio de 2020, de <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>

Coolselector® 2 Exercises. (s. f.). 220.

Court Monteverde, E., Aching Guzmán, C., & Aching Samatelo, J. L. (2009). *Matemáticas financieras*. Cengage Learning Argentina.

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>

Dossat, R. (1961). *Principles of Refrigeration* (1ed ed.). John Wiley & Sons INC.

EES: Engineering Equation Solver | F-Chart Software: Engineering Software. (s. f.). Recuperado 26 de mayo de 2020, de <http://www.fchartsoftware.com/ees/>

Fine, A. (1997). *Field testing of CFC-free, energy-efficient refrigerators in China*. 203. <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/epa-ee-ac-project1997.pdf>

Gentle, R., Edwards, P., & Bolton, B. (2001). Thermodynamics. En *Mechanical Engineering Systems* (pp. 7-111). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-075065213-1/50002-7>

GIZ. (2016). *MANUAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES PARA HONDURAS* [Eficiencia Energética]. <http://www.andi.hn/wp-content/uploads/2016/08/MANUAL-DE-EFICIENCIA-ENERGETICA-EN-LA-CONSTRUCCION-DE-EDIFICACIONES-EN-HONDURAS.pdf>

- Godwin, D. S. (1994). *Results of Soft-Optimized System Tests in ARI's R-22 Alternative Refrigerants Evaluation Program*. 7.
- Goríbar, E. (2009). *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración* (3ra ed.). Límusa.
- Gray, E. (2020). *NASA Reports Arctic Stratospheric Ozone Depletion Hit Record Low in March*. NASA. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/nasa-reports-arctic-stratospheric-ozone-depletion-hit-record-low-in-march>
- Harby, K. (2017). Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1247-1264. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.039>
- Historial de Tarifas. (s. f.). CREE. Recuperado 8 de junio de 2020, de <https://www.cree.gob.hn/historial-de-tarifas/>
- Holman, J. (1999). *Transferencia de calor* (1ra ed.). CECSA.
- Hundy, G. (2016). *Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps*. (5.<sup>a</sup> ed.). Butterworth-Heinemann.
- Jung, D., Park, B., & Lee, H. (1999). Evaluation of supplementary/retrofit refrigerants for automobile air-conditioners charged with CFC12. *International Journal of Refrigeration*, 22, 558-568. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00022-5)
- Kataoka, O., Yoshizawa, M., & Hirakawa, T. (2000). Allowable Charge Calculation Method for Flammable Refrigerants. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 9.

- Kubba, S. (2017). *Handbook of Green Building Design and Construction* (2.<sup>a</sup> ed.). Butterworth-Heinemann.
- Makhnatch, P., & Khodabandeh, R. (2014). The role of environmental metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the selection of low GWP refrigerant. *Energy Procedia*, 61, 2460 – 2463. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.023>
- Miller, R., & Miller, M. (2006). *Air Conditioning and Refrigeration* (3ra ed.). McGraw-Hill.
- Monharaj, M., Jayaraj, S., & Muraleedharan, C. (2009). Environment friendly alternatives to halogenated. *Greenhouse Gas Control*, 3, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.07.003>
- Park, K.-J., & Jung, D. (2007). Thermodynamic performance of HCFC22 alternative refrigerants. *Energy and Buildings*, 39(6), 675-680. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.003>
- PNUD. (2017). *Logros del Pasado y Oportunidades Futuras* (p. 50). <https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Ozone%20and%20Climate/30%20years%20of%20the%20Montreal%20Protocol%20-%20Spanish.pdf>
- Raj, M. H., & Lal, D. M. (2008). A comparative study on the performance of a R22 window air conditioner retrofitted with R407C/R290/R600a refrigerant mixture. *International Journal of Ambient Energy*, 29(4), 207-217. <https://doi.org/10.1080/01430750.2008.9675079>
- Sampieri, R., Collado, C., & Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGraw-Hill.

- Sarbu, I. (2014). A review on substitution strategy of non-ecological refrigerants from vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump systems. *International Journal of Refrigeration*, 46, 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.023>
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2016). Vapour Compression-Based Heat Pump Systems. En *Ground-Source Heat Pumps* (pp. 7-25). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804220-5.00002-3>
- Smeth, G. D., Corte, F. de, Notelé, R., & Berghmans, J. (1999). Comparison of two standard test methods for determining explosion limits of gases at atmospheric conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 70, 105-113. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00163-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00163-6)
- Stolarski, R. (1988). The Antarctic Ozone Hole. *Scientific American*, 258(1), 30-37.
- Tang, W., He, G., Sun, W., Zhou, S., Cai, D., & Zhu, Y. (2018). Assessment of leakage and risk reduction of R290 in a split type household air conditioner. *International Journal of Refrigeration*, 89, 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.03.012>
- UNEP. (2003). *Handbook for International treaties for protection of the ozone layers* (6ta ed.). UNON.
- UNEP. (2017). REPORT OF THE SEVENTY-NINTH MEETING OF THE EXECUTIVE COMMITTEE. *EXECUTIVE COMMITTEE OF THE MULTILATERAL FUND FOR THE IMPLEMENTATION OF THE MONTREAL PROTOCOL*. United Nations Environment Programme, Bangkok. UNEP/OzL.Pro/ExCom/79/51
- Wang, S., & Lavan, Z. (1999). *Air-Conditioning and Refrigeration. Mechanical Engineering Handbook*. (1.<sup>a</sup> ed.). CRC Press.

- WMO. (s. f.). *World Weather Information Service*. World Weather Information Service. Recuperado 8 de junio de 2020, de <https://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=283>
- Wongwises, S., & Chimres, N. (2005). Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace. *Energy Conversion and Management*, 46(1), 85-100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.02.011>
- Wu, J. H., Yang, L. D., & Hou, J. (2012). Experimental performance study of a small wall room air conditioner retrofitted with R290 and R1270. *International Journal of Refrigeration*, 35(7), 1860-1868. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.06.004>
- Yu, C.-C., & Teng, T.-P. (2014). Retrofit assessment of refrigerator using hydrocarbon refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, 66(1-2), 507-518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.050>
- Zemansky, M., & Dittman, R. (1986). *Calor y Termodinámica* (1ed ed.). McGraw-Hill.
- Zhang, W., Yang, Z., Zhang, X., Lv, D., & Jiang, N. (2016). Experimental research on the explosion characteristics in the indoor and outdoor units of a split air conditioner using the R290 refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 67, 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.03.018>
- Zhou, G., & Zhang, Y. (2010). Performance of a split-type air conditioner matched with coiled adiabatic capillary tubes using HCFC22 and HC290. *Applied Energy*, 87, 1522-1528. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.005>

## ANEXOS

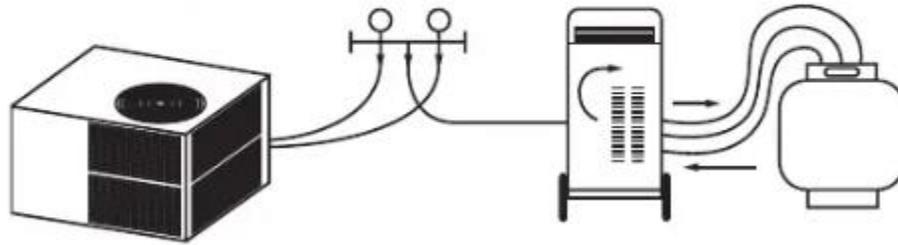
### ANEXO 1. IMPLEMENTACIÓN SEGURA DE UN HIDROCARBURO

A continuación, se listan las condiciones de seguridad que se tienen que implementar en un sistema que trabaja con hidrocarburos, tanto en el momento de la sustitución como para su uso:

1. **Calcular la carga permisible del sistema:** asegurarse que la ubicación del lugar donde se va a sustituir el refrigerante cumpla los requisitos de carga permisible, ya que de esta manera el usuario se asegura de que en el caso de una fuga no va a causar accidentes graves.
2. **Revisar componentes:** asegurarse que todos los componentes del sistema estén en buen estado debido a que hay que estos pueden funcionar como fuentes de ignición para el hidrocarburo.
3. **Ventilación del lugar:** como se demostró anteriormente, en la velocidad de propagación de una fuga contribuye grandemente la ventilación del lugar. Por lo tanto, si no se quiere invertir en un detector de fugas lo mejor es ubicarlo en un lugar que tenga un buen flujo de aire.
4. **Fuentes de ignición:** es de suma importancia sellar, volver a soldar o aislar cualquier componente que pueda hacer chispas o actuar como una fuente de ignición. Es importante mencionar que no solo las que se detalló actúan como fuente de ignición, por lo tanto, un experto tendrá que evaluar todos los componentes del sistema.
5. **Extintor:** aunque no es obligación, invertir en un extintor para áreas que tienen un sistema con hidrocarburo es de suma importancia.
6. **Marcar el sistema:** una vez ya sustituido el refrigerante, hay que marcar el sistema con las debidas etiquetas que lo identifican como inflamable.

## **ANEXO 2. RECICLAJE DEL REFRIGERANTE**

Para poder adaptar al sistema al uso del primer refrigerante es de suma importancia eliminar todo rastro del refrigerante que previamente utilizaba el sistema. Para esto en la investigación se recomienda extraerlo para poder ser reciclado y reutilizado, esto mediante un equipo de recuperación, un juego de manómetros y el respectivo cilindro identificado, el proceso previamente descrito se ilustra a continuación.



**Ilustración 29 - Recuperación del refrigerante R22**

**ANEXO 2. TABLA P-T R22**



**DUPONT**  
The miracles of science®

**DuPont Refrigerantes**  
**GUÍA DE REFERENCIA PARA BOLSILLO**

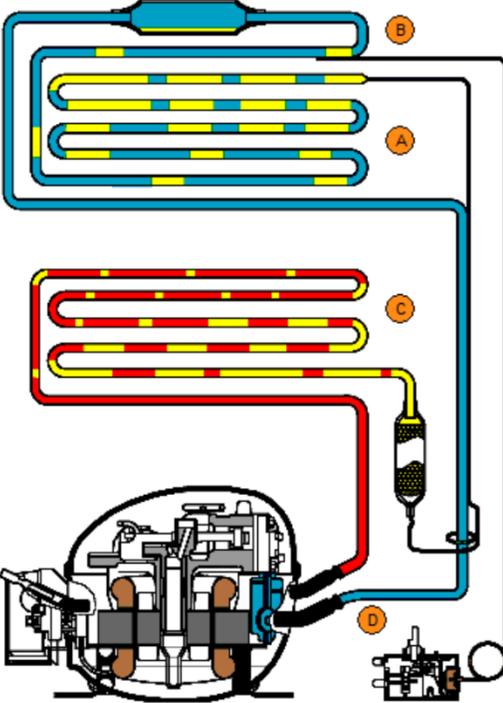
(psig)  
VAPOR SATURADO

Temp. °F	DuPont® Freon®		DuPont® Suva®						DuPont® ISCEON®					Temp. °C
	12 R-12	22 R-22	134a R-134a	MP39 R-401A	404A R-404A	407C R-407C	410A R-410A	507 R-507	MO29 R-422D	MO49Plus R-437A	MO59 R-417A	MO79 R-422A	MO99 R-438A	
-40	11.0"	0.6	14.8"	13.8"	4.3	4.6"	10.7	5.4	2.3"	12.5"	7.6"	3.1	5.2	-40
-38	10.0"	1.4	13.9"	12.9"	5.3	3.2"	12.0	6.4	0.8"	11.5"	6.3"	4.1	3.8	-38
-36	8.9"	2.2	13.0"	11.9"	6.3	1.6"	13.3	7.5	0.4	10.4"	4.9"	5.1	2.3	-36
-34	7.8"	3.1	12.0"	10.9"	7.4	0.1"	14.7	8.6	1.2	9.3"	3.5"	6.1	0.8	-34
-32	6.7"	4.0	10.9"	9.8"	8.5	0.8	16.2	9.8	2.1	8.1"	2.1"	7.2	0.4	-32
-30	5.5"	4.9	9.8"	8.7"	9.6	1.6	17.7	11.0	3.0	6.9"	0.5"	8.3	1.2	-30
-28	4.3"	5.9	8.7"	7.5"	10.8	2.5	19.3	12.2	3.9	5.6"	0.5	9.5	2.1	-28
-26	3.0"	6.9	7.5"	6.2"	12.0	3.5	20.9	13.5	4.9	4.2"	1.3	10.7	3.0	-26
-24	1.7"	8.0	6.3"	5.0"	13.3	4.4	22.6	14.8	5.9	2.8"	2.2	11.9	3.9	-24
-22	0.3"	9.1	5.0"	3.6"	14.6	5.4	24.4	16.2	7.0	1.4"	3.1	13.2	4.9	-22
-20	0.5	10.2	3.7"	2.2"	16.0	6.5	26.2	17.6	8.1	0.1	4.0	14.6	5.9	-20
-18	1.3	11.4	2.3"	0.8"	17.4	7.6	28.1	19.1	9.2	0.8	5.0	16.0	7.0	-18
-16	2.0	12.6	0.8"	0.3	18.9	8.7	30.0	20.6	10.4	1.6	6.0	17.4	8.1	-16
-14	2.8	13.9	0.4	1.1	20.4	9.9	32.0	22.2	11.7	2.5	7.0	18.9	9.2	-14
-12	3.6	15.2	1.1	1.9	22.0	11.1	34.1	23.8	12.9	3.4	8.1	20.5	10.4	-12
-10	4.5	16.5	1.9	2.8	23.6	12.3	36.3	25.5	14.3	4.3	9.2	22.1	11.6	-10
-8	5.3	17.9	2.8	3.6	25.3	13.7	38.5	27.2	15.6	5.2	10.4	23.7	12.9	-8
-6	6.2	19.4	3.6	4.5	27.0	15.0	40.8	29.0	17.1	6.2	11.6	25.4	14.2	-6
-4	7.2	20.9	4.6	5.4	28.8	16.4	43.2	30.9	18.5	7.2	12.8	27.2	15.6	-4
-2	8.1	22.4	5.5	6.4	30.7	17.9	45.7	32.8	20.1	8.3	14.1	29.1	17.0	-2
0	9.1	24.0	6.5	7.4	32.6	19.4	48.2	34.8	21.7	9.4	15.5	30.9	18.5	0
2	10.1	25.7	7.5	8.5	34.6	21.0	50.8	36.8	23.3	10.5	16.9	32.9	20.0	2
4	11.2	27.4	8.5	9.5	36.6	22.6	53.5	38.9	25.0	11.7	18.3	34.9	21.6	4
6	12.3	29.2	9.6	10.7	38.7	24.3	56.3	41.1	26.7	12.9	19.8	37.0	23.2	6
8	13.4	31.0	10.8	11.8	40.9	26.1	59.2	43.4	28.5	14.2	21.3	39.1	24.9	8
10	14.6	32.8	11.9	13	43.1	27.9	62.2	45.7	30.4	15.5	22.9	41.4	26.6	10
12	15.8	34.8	13.1	14.2	45.4	29.8	65.2	48.0	32.3	16.9	24.6	43.6	28.4	12
14	17.0	36.8	14.4	15.5	47.8	31.7	68.4	50.5	34.3	18.3	26.3	46.0	30.3	14
16	18.3	38.8	15.7	16.9	50.2	33.7	71.6	53.0	36.4	19.7	28.1	48.4	32.2	16
18	19.6	40.9	17.0	18.2	52.7	35.7	74.9	55.6	38.5	21.2	29.9	50.9	34.2	18
20	21.0	43.1	18.4	19.6	55.3	37.9	78.4	58.2	40.7	22.8	31.7	53.5	36.2	20
22	22.4	45.3	19.9	21.1	58.0	40.1	81.9	61.0	42.9	24.4	33.7	56.1	38.3	22
24	23.8	47.6	21.3	22.6	60.7	42.3	85.5	63.8	45.2	26.0	35.7	58.8	40.5	24
26	25.3	50.0	22.9	24.2	63.5	44.7	89.2	66.7	47.6	27.8	37.7	61.6	42.8	26
28	26.8	52.4	24.5	25.8	66.4	47.1	93.1	69.6	50.1	29.5	39.9	64.5	45.1	28
30	28.4	55.0	26.1	27.4	69.3	49.6	97.0	72.7	52.6	31.3	42.0	67.5	47.5	30
32	30.0	57.5	27.8	29.1	72.4	52.1	101.1	75.8	55.2	33.2	44.3	70.5	49.9	32
34	31.7	60.2	29.5	30.9	75.5	54.8	105.2	79.0	57.9	35.1	46.6	73.6	52.5	34
36	33.4	62.9	31.3	32.7	78.7	57.5	109.5	82.3	60.6	37.1	49.0	76.8	55.1	36
38	35.1	65.7	33.1	34.6	82.0	60.3	113.9	85.7	63.5	39.2	51.5	80.1	57.7	38
40	36.9	68.6	35.0	36.5	85.4	63.2	118.4	89.2	66.4	41.3	54.0	83.5	60.5	40
42	38.7	71.5	37.0	38.5	88.8	66.1	123.0	92.7	69.4	43.5	56.6	87.0	63.3	42
44	40.6	74.5	39.0	40.5	92.4	69.2	127.7	96.4	72.5	45.7	59.3	90.5	66.3	44
46	42.6	77.6	41.1	42.6	96.0	72.3	132.6	100.1	75.6	48.0	62.0	94.2	69.3	46
48	44.6	80.8	43.2	44.8	99.8	75.5	137.5	104.0	78.9	50.4	64.8	97.9	72.3	48
50	46.6	84.1	45.4	47.0	103.6	78.8	142.6	107.9	82.2	52.9	67.8	101.8	75.5	50
52	48.7	87.4	47.7	60.4	109.2	101.7	148.4	112.0	96.1	61.6	81.1	111.3	94.6	52
54	50.9	90.8	50.0	63.0	113.3	105.6	153.8	116.2	99.8	64.4	84.4	115.4	98.3	54
56	53.1	94.4	52.4	65.7	117.4	109.6	159.3	120.4	103.6	67.1	87.7	119.7	102.1	56
58	55.3	98.0	54.9	68.4	121.7	113.7	164.9	124.7	107.4	70.0	91.1	124.0	105.9	58
60	57.6	101.6	57.4	71.2	126.0	117.9	170.7	129.2	111.4	72.9	94.6	128.4	109.8	60
62	60.0	105.4	60.0	74.1	130.5	122.3	176.6	133.7	115.4	75.9	98.2	132.9	113.9	62
64	62.4	109.3	62.7	77.0	135.0	126.7	182.7	138.4	119.6	79.0	101.9	137.5	118.0	64
66	64.9	113.2	65.4	80.0	139.7	131.2	188.9	143.1	123.8	82.1	105.6	142.3	122.2	66
68	67.5	117.3	68.2	83.1	144.4	135.8	195.3	148.0	128.1	85.4	109.5	147.1	126.6	68
70	70.1	121.4	71.1	86.3	149.3	140.5	201.8	153.0	132.6	88.7	113.4	152.1	131.0	70
72	72.7	125.7	74.1	89.5	154.3	145.4	208.4	158.1	137.1	92.1	117.5	157.2	135.5	72
74	75.5	130.0	77.1	92.8	159.4	150.3	215.2	163.3	141.7	95.5	121.6	162.3	140.2	74
76	78.2	134.5	80.2	96.2	164.6	155.3	222.2	168.6	146.5	99.1	125.8	167.6	144.9	76
78	81.1	139.0	83.4	99.7	169.9	160.5	229.3	174.1	151.3	102.8	130.1	173.0	149.8	78
80	84.0	143.6	86.7	103.2	175.4	165.8	236.5	179.6	156.3	106.5	134.5	178.6	154.7	80
82	87.0	148.4	90.0	106.8	181.0	171.2	244.0	185.3	161.4	110.3	139.1	184.2	159.8	82
84	90.0	153.2	93.5	110.6	186.7	176.8	251.6	191.1	166.5	114.2	143.7	190.0	165.0	84
86	93.2	158.2	97.0	114.4	192.5	182.4	259.3	197.1	171.8	118.2	148.4	195.9	170.3	86
88	96.3	163.2	100.6	118.2	198.4	188.2	267.3	203.1	177.2	122.3	153.2	201.9	175.7	88

### ANEXO 3. DIMENSIONAMIENTO TUBO CAPILAR.

Danfoss Capillary Tube Selector

DanCap™ Version 1.0 Database 1.0 



**Input Data**

Refrigerant: R22

A Heat load of the system: 13000 Btu/hr

B Evaporating temperature: 4 °C

C Condensing temperature: 49 °C

D Return gas temperature: 0 °C

**Capillary Tube Recommendation**

Flow Rate: 4.37 CFM (N<sub>2</sub> at delta p 145 psi)

Length	Inner Diameter
0.12 m	1.20 mm
0.15 m	1.25 mm
0.26 m	1.40 mm
0.37 m	1.50 mm
0.51 m	1.60 mm
0.92 m	1.80 mm
1.56 m	2.00 mm
2.52 m	2.20 mm
4.77 m	2.50 mm

Optimal selection is highlighted in green.

Homepage: [compressors.danfoss.com](http://compressors.danfoss.com)

Help Print Settings

### ANEXO 4. INTERFAZ GRÁFICA DEL EES.

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Parametros de diseño Calculate

RS= Propane

$Q_t = 4.146$  [kW]  $h_1 = 577.6$

$Q_{load} = 1.24$  [kW]  $h_2 = 630.9$   $h_3 = 331$

**Resultados**

COP = 1.639 [-]

EER = 5.596 [-]

$Q_h = 5.042$  [kW]

$\dot{m} = 0.01681$  [kg/s]

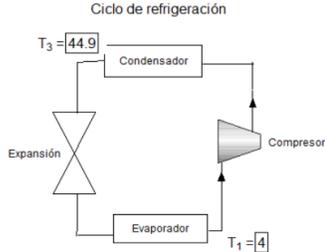
RC = 2.86 [-]

RE = 246.6 [kJ/kg]

$W_c = 53.3$  [kJ/kg]

P = 0.7565 [kW]

Ciclo de refrigeración



## ANEXO 5. PROGRAMACIÓN EES

```
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
[Datos]
//R$=R22
//R2$=R290
//Q_f=4.146
//Q_load=1.24
//T[1]=4
//T[3]=44.9
x[1]=1
//x[2]=1
x[3]=0
//x[4]=0
//h[1]=406.86
//h[3]=261.86
//h[2]=437.09
//h2[1]=577.64
//h2[2]=630.91
//h2[3]=330.972

"Modelando el sistema R22"
"Estado 1"
P[1]=Pressure(R$,T=T[1],x=x[1])
"Estado 2"
P[3]=P[2]
"Estado 3"
P[3]=Pressure(R$,T=T[3],x=x[3])
"Estado 4"
P[1]=P[4]
h[3]=h[4]

"Modelando el sistema R290"
"Estado 1"
P2[1]=Pressure(R2$,T=T[1],x=x[1])
"Estado 2"
P2[3]=P2[2]
"Estado 3"
P2[3]=Pressure(R2$,T=T[3],x=x[3])

"Estado 4"
P2[1]=P2[4]
h2[3]=h2[4]

"Parametros de diseño"
"Ecuaciones para el R22"
Q_f=m_dot*(h[1]-h[4]) "Evaporador"
RE=h[1]-h[4] "Efecto refrigerante"
W_c=h[2]-h[1] "Trabajo compresor"
P=m_dot*(h2-h1) "Potencia"
Q_h=m_dot*(h[2]-h[3]) "Calor de rechazo del condensador"
RC=P[3]/P[1] "Relación de compresión"
COP=Q_load/P "Coeficiente de rendimiento"
EER=3.4141*COP "Eficiencia energetica"

"Ecuaciones para el R290"
m2_dot=m_dot*0.316
Q_f2=m2_dot*(h2[1]-h2[4]) "Evaporador"
RE2=h2[1]-h2[4] "Efecto refrigerante"
W_c2=h2[2]-h2[1] "Trabajo compresor"
P2=m2_dot*(h2[2]-h2[1]) "Potencia"
Q_h2=m2_dot*(h2[2]-h2[1]) "Calor de rechazo del condensador"
RC2=P2[3]/P2[1] "Relación de compresión"
COP2=Q_load/P2 "Coeficiente de rendimiento"
EER2=3.4141*COP2 "Eficiencia energetica"

Line: 50 Char: 40 Wrap: On Inset Caps Lock: Off SLC: kPa h1: mase: den Warnings: On Unit Chk: Auto Complex: Off
```