



Diseño de herramienta computacional para el análisis y diagnóstico energético de compresores

**Felipe José Galván Arenilla
Hugo Alberto Palacin Payares**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Barranquilla, Colombia
2020

Diseño de herramienta computacional para el análisis y diagnóstico energético de compresores.

**Felipe José Galván Arenilla
Hugo Alberto Palacin Payares**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director (a):
MSc. Fabio Bermejo Altamar

Línea de Investigación:
Energía y mantenimiento
Grupo de Investigación:
FOURIER

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Barranquilla, Colombia
2020

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a Dios por un logro más en mi vida profesional, familiares, amigos, profesores, compañeros de clase, parte administrativa de la universidad, especialmente a mi madre (Rosa Arenilla) y mi hermana (Carmen Celis) pues han sido las mujeres que me han motivado a seguir adelante han estado para mí en los mejores y los peores momentos, me han ayudado a ser un gran hombre y profesional, las dos son mi orgullo y mi ejemplo.

Quiero agradecer también a los profesores Robert Castillo que aun no siendo profesor principal de mi carrera me ayudo demasiado, Roberto Bravo el hombre que me enseñó a través del cálculo a entender la vida, un gran ejemplo de profesionalismo y de persona.

Agradecer también al profesor al profesor Fabio Bermejo de los mejores profesionales que he conocido y uno de los mejores profesores que he tenido, un gran ejemplo de profesionalismo

Y, por último, pero no menos importante profesor José Hernández un profesor relativamente nuevo que conocí ya terminando la carrera, pero la verdad me impresiono su pasión por darnos de su conocimiento la verdad me le quito el sombrero por su amor a su profesión, además de ser un ser humano increíble mis agradecimientos y respeto siempre.

Felipe J. Galvan

Agradecimientos

Gracias a Dios porque su presencia siempre ha estado presente en cada etapa de mi vida. A mi padre Hugo Palacin Leiva y a mi madre Nora Payares Parra, por su apoyo incondicional en cada logro que he querido alcanzar, siempre motivándome y dándome excelentes consejos que me han servido para formarme y luchar por mis objetivos.

Gracias a mi esposa Arlet Pacheco por su gran comprensión y apoyo durante todo el tiempo dedicado a los estudios, a mis hijos Esteban y Steven, que me alientan a dar siempre lo mejor de mí.

A todo el cuerpo docente por transmitir sus conocimientos y por su orientación durante toda esta trayectoria universitaria.

Gracias a todos ellos, hoy puedo dar constancia de que los sueños si se hacen realidad.

Hugo Palacin P

Resumen

En el presente trabajo se desarrollará una herramienta computacional para el análisis y diagnóstico energético de compresores tipo scroll, utilizando el programa Matlab. El proceso de diseño será establecido en tres fases o pautas, la primera enfocada en una revisión de la literatura que permita establecer ecuaciones, modelos y fórmulas para caracterizar y conocer aspectos técnicos y operativos del compresor, una segunda en el proceso de programación comprendido en plasmar las ecuaciones en Matlab y diseñar una interfaz amigable para conocer variables de interés tales como eficiencia, relación de compresión y consumo eléctrico y finalmente una tercera fase centrada en validar la herramienta computacional y determinar como tal su confiabilidad y limitaciones.

Palabras clave: Compresores, Diagnostico, Eficiencia energética, Herramienta Computacional.

Abstract

In this work, a computational tool will be developed for the energy analysis and diagnosis of scroll compressors using the Matlab program. The design process will be established in three phases or guidelines, the first focused on a review of the literature that allows establishing equations, models and formulas to characterize and know the technical and operational aspects of the compressor, a second in the programming process included in capturing the equations in Matlab and design a friendly interface to know variables of interest such as efficiency, compression ratio and electrical consumption and finally a third phase focused on validating the computational tool and determining its reliability and limitations as such.

Keywords: Computational Tool, Compressors, energy efficiency, diagnosis.

Contenido

	Pág.
1 Capítulo 1 – Planteamiento del problema, justificación y objetivos	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación.....	5
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
2 Capítulo 2 – Marco teórico y estado del arte.....	7
2.1 Marco teórico.....	7
2.1.1 Sistema de refrigeración por compresión	7
2.1.2 Tipos de compresores	10
2.1.3 Compresores de desplazamiento dinámico o flujo continuo.	13
2.1.4 Compresores de desplazamiento positivo.	15
2.1.5 Funcionamiento de un compresor.....	19
2.1.6 Modelados matemáticos de compresores	23
2.2 Estado del arte	25
3 Capítulo 3 – Metodología y resultados	31
3.1 Metodología.....	31
3.1.1 Revisión de la literatura enfocada a compresores scroll	32
3.1.2 Correlaciones para caracterización de Compresores Scroll	33
3.1.3 Calculo y minimización del trabajo del compresor.....	40
3.1.4 Interfaz del programa.....	44
3.1.5 Diseño preliminar de la herramienta computacional.....	45
3.1.6 Confiabilidad del programa.....	46
3.2 Resultados y discusión	49
3.2.1 Revisión bibliográfica.....	49
3.2.2 Diseño de la herramienta computacional.....	52
3.2.3 Manual del usuario	56
3.2.4 Confiabilidad del programa.....	61
4 Conclusiones y recomendaciones	66
4.1 Conclusiones	66
4.2 Recomendaciones	68
5 Bibliografía.....	73

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema y elementos fundamentales del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.	8
Figura 2. Clasificación de compresores.....	10
Figura 3. Compresor hermético (Robison & Beaty, 2000).....	11
Figura 4. Compresor Semi-hermético.....	12
Figura 5. Esquema de un compresor abierto.....	12
Figura 6. Diseño de un compresor axial como elemento participe de un ciclo Brayton. ..	13
Figura 7. Diseño y bosquejo de un compresor tipo turbocompresor.....	14
Figura 8. Funcionamiento de un compresor tipo turbocompresor.....	16
Figura 9. Funcionamiento principal de un compresor Scroll.....	17
Figura 10. Ruptura de la espiral interna del compresor.....	19
Figura 11. Control ON/OFF de un compresor Scroll.....	20
Figura 12. Control ON/OFF de un compresor Scroll.....	21
Figura 13. Diagrama Presión-Entalpia con compresión real e isentrópico.	22
Figura 14. Comparación de errores en la tasa de flujo másico pronosticado para datos de mapas frente a muestras LHS.....	26
Figura 15. Comportamiento de $Q. 0$ en condiciones ASHRAE, CECOMAF y PROPUESTAS.....	28
Figura 16. Comportamiento del COP en condiciones ASHRAE, CECOMAF y PROPUESTAS.....	29
Figura 17. Esquema metodológico de trabajo.....	32
Figura 18. Partes y elementos de un motor eléctrico.....	35
Figura 19. Diagrama P-v de un proceso Isentrópico, Politrópico e isotérmico.....	41

Figura 20. Diagrama P-v y T-s de un proceso con interenfriamiento	42
Figura 21. Diagrama h-s de un compresor con proceso real y un proceso isentrópico....	43
Figura 22. Diagrama de flujo del programa diseñado. Fuente: Propia.....	44
Figura 23. Diagrama de cálculo de error de la potencia de entrada.	47
Figura 24. Diagrama de cálculo de error de la potencia de salda.	47
Figura 25. Flujograma de la herramienta computacional.	52
Figura 26. Interfaz del programa desarrollado en Matlab.	53
Figura 27. Parámetros de entrada en el programa.	54
Figura 28. Columna de resultados.	55
Figura 29. Medición de la línea de alimentación.....	57
Figura 30. Medición de la línea de alimentación para obtener la intensidad de la corriente eléctrica.....	57
Figura 31. Medición de presiones de línea de alta y de baja en un compresor.....	58
Figura 32. Herramienta digital para la medición de la temperatura y presión.	58
Figura 33. Columna de parámetros de entrada.	59
Figura 34. Botón de calcular.....	60
Figura 35. Columna de resultados	61
Figura 36. Datos obtenidos y suministrados por la herramienta computacional para su validación.	63

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Valor de diversas constantes para la caracterización del compresor.	34
Tabla 2. Valores experimentales para cargas parasitas según IEEE STANDARD 112... ..	40
Tabla 3. Resumen de la revisión bibliográfica	49
Tabla 4. Variables operacionales del Mitsubishi LH53VBAC (Carmona, 2019)	61
Tabla 5. Variables operacionales del Mitsubishi LH53VBAC (Carmona, 2019)	62
Tabla 6. Resumen de resultados.....	63

Lista de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1	21
Ecuación 2	22
Ecuación 3	23
Ecuación 4	24
Ecuación 5	24
Ecuación 6	24
Ecuación 7	33
Ecuación 8	33
Ecuación 9	34
Ecuación 10	34
Ecuación 11	35
Ecuación 12	36
Ecuación 13	36
Ecuación 14	36
Ecuación 15	37
Ecuación 16	37
Ecuación 17	38
Ecuación 18	38
Ecuación 19	38
Ecuación 20	38
Ecuación 21	39
Ecuación 22	39
Ecuación 23	41
Ecuación 24	42

Ecuación 25	42
Ecuación 26	42
Ecuación 27	43
Ecuación 28	43

Introducción

Los compresores son dispositivos mecánicos cuya única función es el aumento de presión de un fluido compresible con objetivo o fin de cumplir con una tarea específica, su aplicación quizás más conocida es en los ciclos de refrigeración por compresión (Nieto, 2018) cuyo tipo de compresor más usado en estos ciclos son conocidos como scroll (RENEDO, 2017).

El compresor scroll se puede considerar como la última generación de los compresores rotativos de paletas (Nieto, 2018; RENEDO, 2017) cuya funcionalidad es clasificada en dos pautas, la primera es succionar el vapor refrigerante y reducir la presión en el evaporador con el objetivo de mantener la temperatura de evaporación deseada, mientras que la segunda pauta consiste en elevar la presión del vapor refrigerante a un nivel lo suficientemente alto, de modo que la temperatura de saturación sea superior a la del medio de enfriamiento disponible para garantizar la condensación del vapor refrigerante (Nieto, 2018).

Otros aspectos importantes de este tipo de compresores radican en su alta confiabilidad, vida útil y precio (Robledo, 2017), de modo que un correcto aspecto de mantenimiento es esencial.

En la actualidad se ha trabajado en el desarrollo de herramientas computacionales que permiten el cálculo del desempeño energético de otros elementos mecánicos tales como los reactores rotativos, todo con el objetivo de minimizar costos de mantenimiento y aumentar productividad (Coral, 2011), a su vez, herramientas que permiten el correcto dimensionamiento y selección de elementos como en el caso de los gasoductos y redes de distribución de gas que garantiza la minimización de costos asociados a su construcción y operación (Lopez, 2014) y adicionalmente en simulaciones computacionales (Karen Figueredo, 2018) que permiten comprender y explicar detalladamente las etapas de expansión y compresión en un turbo compresor radial.

Otros tipos de herramientas desarrolladas permiten el diagnóstico de fallas de diversos equipos por medio de un sistema basado en conocimiento y un módulo de herramientas de cálculo (Narvaez, 2012) de modo que el operador pueda determinar si una variable de

calidad está por fuera de control o presenta tendencia a salir de control y así realizar las acciones correctivas.

Pero en la actualidad no existe una herramienta computacional enfocada en los compresores scroll que permita desde un punto de vista energético, su correcto diagnóstico operativo, cuya finalidad sea obtener información detallada sobre las condiciones del sistema sin intervenir en la operación de este, es decir, un análisis no invasivo, por lo que el diseño de una herramienta orientada al análisis de los compresores scroll, es de mucha importancia, dicha herramienta computacional será diseñada en un lenguaje de programación en el software Matlab.

1 Capítulo 1 – Planteamiento del problema, justificación y objetivos

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad los sistemas de refrigeración se han convertido en un gran reto ingenieril debido a su alta demanda como consecuencia del crecimiento poblacional, la necesidad de confort térmico y conservación de alimentos. Como es conocido el compresor es el elemento mecánico que garantiza el ciclo de refrigeración por compresión y gracias a su economía y confiabilidad muchos de estos ciclos presentan compresores tipo scroll (Cantó & Navarro Peris, 2017). Es muy importante garantizar un buen aspecto de mantenimiento de estos tipos de compresores, de modo que sea conveniente aprovechar toda su vida útil no solo para minimizar los gastos de mantenimiento si no de consumo eléctrico, manteniendo siempre su alta eficiencia energética (Coral, 2011; Lopez, 2014), todo esto enfocado a una buena gestión ambiental y operativa del ciclo de refrigeración.

Debido a la necesidad del ser humano los sistemas de refrigeración y aire acondicionado ya no son considerados un lujo sino una necesidad para garantizar un confort térmico a las personas o bien la conservación de los alimentos como carnes, frutas, bebidas entre otros y como es bien conocido el 90% de la energía consumida por un sistema de refrigeración es causada por el compresor (RUIZ, 2016) y en la gran mayoría de sistemas de aire acondicionado y refrigeración los compresores instalados o presentes son tipo scroll, por ello existe una necesidad de diagnosticar estos tipos de compresores, no solo desde un punto de vista técnico y operativo si no energético con el fin de identificar su condición de trabajo y consumo para así poder establecer acciones de mejora para aprovechar al máximo su vida útil y es por ello que se propone diseñar una herramienta computacional que permita no solo en análisis, si no el diagnostico energético de

compresores tipo scroll, debido a que actualmente no existe una herramienta integral que presente estas características en el mercado y dado esta dificultad y limitación se formulan la siguientes preguntas:

¿De qué manera se podría comprobar el buen desempeño energético y operativo de un compresor tipo scroll?

¿Qué importancia o rol fundamental presenta las variables térmicas en el funcionamiento y caracterización de los compresores tipo scroll?

¿Sería posible adquirir información del sistema de compresión sin intervenir en la operación del mismo?

1.2 Justificación

La gestión energética es un campo que diariamente presenta una gran importancia no solo en nuestro país si no a nivel mundial, debido a la necesidad de buscar niveles altos de eficiencia que solo es logrado con el desarrollo de nuevas ideas y/o herramientas que permitan no solo optimizar procesos si no en diagnosticar energéticamente un elemento mecánico (Luis Fernando Mantilla Peñalba, 2013), con este proyecto se buscó diseñar una herramienta computacional cuyo beneficio no solo es diagnosticar de manera rápida y no invasiva un compresor tipo scroll, si no, establecer energéticamente su funcionalidad en términos de eficiencia, consumo y rendimiento.

Desde un aspecto industrial sería una herramienta muy útil en el sector de la refrigeración debido a la facilidad de diagnosticar energéticamente un compresor tipo scroll sin la necesidad de detener o interrumpir el proceso, es decir, sería posible diagnosticar el compresor permitiendo la continuidad de la labor que se esté ejecutando.

Así mismo, cabe mencionar que el desarrollo de este proyecto favorecerá a la Universidad Antonio Nariño y al grupo de investigación FOURIER porque existe un nuevo aporte científico y técnico centrado en el diseño de una herramienta computacional de carácter no invasivo y enfocada a gestión energética e igualmente a los estudiantes del programa debido a la aplicación de sus conocimientos adquiridos a lo largo de su formación para desarrollar y aplicar dicha herramienta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una herramienta computacional que permita el análisis y diagnóstico energético para compresores tipo scroll.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer por medio de una revisión de la literatura una metodología que permita el análisis y diagnóstico energético de compresores.
- Desarrollar por medio del programa Matlab una interfaz que permita el análisis y diagnóstico energético de compresores tipo scroll.
- Validar por medio de un caso plasmado en la literatura la confiabilidad de la herramienta computacional.

2 Capítulo 2 – Marco teórico y estado del arte

2.1 Marco teórico

2.1.1 Sistema de refrigeración por compresión

Los sistemas de refrigeración por compresión abarcan un gran número de dispositivos y elementos de uso cotidiano como lo son los aires acondicionados, neveras, ciclos, entre otros. Este ciclo presenta cuatro elementos fundamentales que garantizan su funcionamiento los cuales son: Evaporador, Condensador, Válvula de estrangulamiento y el compresor, siendo este último el causante del consumo energético del sistema. (Ruz, Fragoso, & Vasquez, 2016)

Para el estudio de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, como se observa en la Figura 1, es necesario la aplicación de diversas ciencias tales como la transferencia de calor, electricidad, mecánica de fluidos, termodinámica y control de procesos, debido a la existencia de elementos electromecánicos clasificados como monofásicos o trifásicos y la aplicación de técnicas de control y automatización de procesos que permiten que dichos sistemas sean altamente eficientes (Pediapress, 2011) debido a la aplicación de variadores de frecuencia y sistemas de inducción de alta eficiencia que garantizan un arranque y par necesario para condiciones óptimas de funcionamiento.

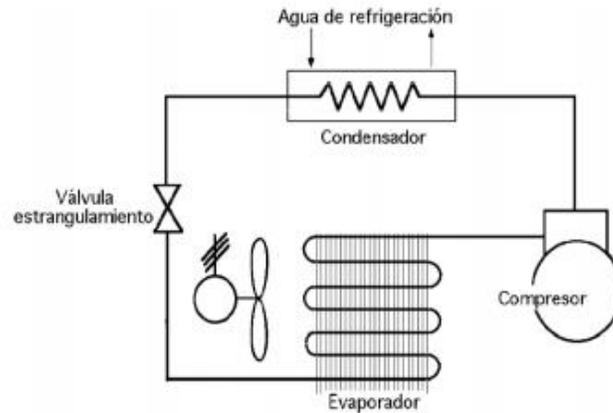


Figura 1. Esquema y elementos fundamentales del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: (Ruz, Fragoso, & Vasquez, 2016)

En un análisis para un correcto diseño, sintonía y caracterización de sistemas de refrigeración por compresión de vapor, es recomendable cuantificar, conocer y establecer un rango de valores operacionales óptimos de modo que a la hora de establecer un modelo se logre representar lo más fielmente posible su comportamiento teniendo presente las siguientes variables:

- Costo operativo
- Temperaturas de trabajo (Temperatura de alta y de baja)
- Tipo de refrigerante
- Capacidad del sistema en carga térmica.

A continuación, se hará una breve explicación de los elementos básicos del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

2.1.1.1 Evaporador

Es un intercambiador de calor que permite un cambio de estado del refrigerante de líquido a vapor, permitiendo así absorber el calor del recinto y garantizar una disminución en su temperatura. Este cambio hace que el refrigerante a la hora de salir del evaporador y

dirigirse al compresor presente una entalpía, temperatura y energía interna superior, garantizando así que el refrigerante sea posible comprimirlo y cumplir el ciclo de refrigeración. (Pediapress, 2011)

2.1.1.2 Condensador

Es un intercambiador de calor que elimina el calor absorbido por el evaporador y el generado por el trabajo del compresor; el fenómeno de transferencia de calor ocurre del condensador al ambiente, debido a que la temperatura del condensador es mayor a la presente del ambiente, de modo que se garantiza una disminución de la temperatura del refrigerante y un cambio de estado de éste, pasando de vapor sobrecalentado a vapor saturado o vapor al 90%. (Jara, y otros, 2017)

2.1.1.3 Válvula de estrangulamiento

Es un dispositivo conocido también como tubo capilar cuyo objetivo es reducir la temperatura y presión del refrigerante por medio del efecto de estrangulamiento permitiendo así el efecto frigorífico; es quizás uno de los elementos y/o dispositivos más importantes después del compresor. (Jara, y otros, 2017; Wang, 2001)

En sistemas avanzados e industriales esta válvula presenta un proceso de control que por medio de un sensor conocido como termopar es capaz de conocer la temperatura de trabajo y realizar acción de abertura o cierre de la válvula controlando así el ingreso del refrigerante al sistema. (Wang, 2001)

2.1.1.4 Compresor

El compresor es conocido como el corazón del sistema (Dincer, 2017) y se encarga de impulsar al fluido refrigerante, de modo que sea posible cumplir con el ciclo de refrigeración, por esta razón representa el 90% del consumo eléctrico del sistema. Básicamente cumple con dos funciones fundamentales la primera es extraer ese vapor obtenido por el evaporador para garantizar y/o mantener a una temperatura y presión establecida el sistema y por otra aumentar la presión del vapor refrigerante a través de la compresión para lograr no solo aumento en presión si no en temperatura logrando el estado de vapor sobrecalentado al refrigerante. Los compresores son fundamentales y garantizan la viabilidad y vida del ciclo de refrigeración por compresión, por ello es

fundamental que presenten una alta eficiencia, fácil mantenimiento, bajo ruido y vibración, larga vida útil y sean económicos (Dincer, 2017).

2.1.2 Tipos de compresores

En la actualidad existen diversos tipos de compresores, todos en función del trabajo o necesidad a cumplir, pero es fundamental establecer que su acción en común o termino en común es suministrar a un fluido en estado gaseoso una energía debido a la presión, logrando así un aumento en su presión y temperatura (Robison & Beaty, 2000). En la Figura 2 se puede apreciar una clasificación básica según el tipo de desplazamiento los cuales pueden ser positivos o flujo continuo.



Figura 2. Clasificación de compresores

Fuente: (Robison & Beaty, 2000)

Es importante mencionar que en términos de montaje existe otra clasificación, la cual será descrita a continuación:

2.1.2.1 Compresores Herméticos

La característica fundamental es que su motor y compresor están encerrados y/o unidos en una misma carcasa (Incluyendo al aceite) son ampliamente usados en ciclos de

refrigeración de baja y mediana potencia (Robison & Beaty, 2000), es quizás conocido por sus múltiples ventajas siendo la más resaltada o visible que no presenta fugas de refrigerante y que su motor es enfriado por el fluido presente a la salida del evaporador pero también se destaca por su desventaja y es que si en algún punto ocurre una falla interna del compresor, es necesario desmontarlo completamente o bien cambiarlo por uno nuevo debido a que son considerados como desechables. La Figura 3 representa un compresor hermético.

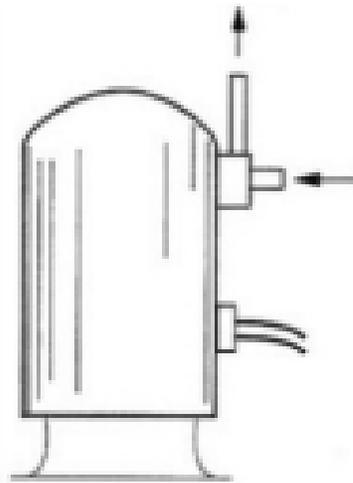


Figura 3. Compresor hermético

Fuente: (Robison & Beaty, 2000)

2.1.2.2 Compresores Semi-Herméticos

Son un tipo de compresor que no se puede desmontar debido a que su construcción impide que ingrese sustancias del exterior que podrían dañar o afectar el motor interno, el cual está bañado en un gas protector que cumple la función de refrigerante, una de sus principales ventajas es que presenta un nulo nivel de fugas pero se resalta que una vez exista una falla se debe modificar por un nuevo compresor, ya que no es admitida una reparación debido a su diseño (Bitzer, 2017). A continuación, se muestra en la Figura 4 un compresor semi-hermético tipo pistón.

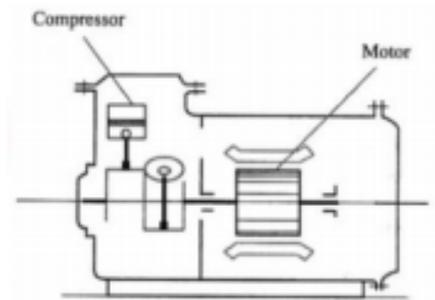


Figura 4. Compresor Semi-hermético

Fuente: (Robison & Beaty, 2000)

2.1.2.3 Compresores abiertos

Se caracteriza porque el compresor se encuentra acoplado por medio de poleas y correas con el motor eléctrico permitiendo así reparaciones más sencillas y diagnósticos más eficientes (Bitzer, 2017), pero al momento de girar rápidamente se pueden desgastar las correas acortando su vida útil y siendo su principal desventaja la fuga de refrigerante y en algunos casos es necesario instalar un sistema de refrigeración auxiliar para el motor, aunque actualmente se aplica el diseño de aletas para mantener el motor en una temperatura óptima de trabajo.

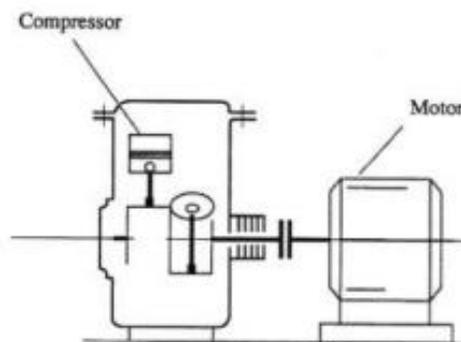


Figura 5. Esquema de un compresor abierto.

Fuente: (Robison & Beaty, 2000)

2.1.3 Compresores de desplazamiento dinámico o flujo continuo.

Su principal característica es que el refrigerante o fluido de trabajo es acelerado y frenado bruscamente, convirtiendo así la energía cinética adquirida por el fluido en energía de presión (Bitzer, 2017), los más conocidos y desarrollados son:

- Axiales
- Centrífugos o turbocompresores.

2.1.3.1 Compresores Axiales

Es quizás el tipo de compresor dinámico más conocido y aplicado a nivel industrial, su principal característica es que el aire aspirado circula paralelo al eje del rotor y que están formados por diversos rotores y entre cada rotor se instala otro disco llamado estator, donde el aire acelerado por el rotor adquiere energía incrementando así su presión antes de ingresar a la sección de discos siguientes.

Es importante señalar que el avance de diseño ha permitido añadir unos alabes (Bitzer, 2017) que permiten guiar y/o orientar el fluido apropiadamente, garantizando que este ingrese con el ángulo de ataque adecuado para minimizar las pérdidas por torbellinos.

Una de sus aplicaciones más conocidas es en el sector energético, donde se aplican en el ciclo Brayton y como elemento de propulsión para las aeronaves y vehículos espaciales como se muestra en la siguiente figura.

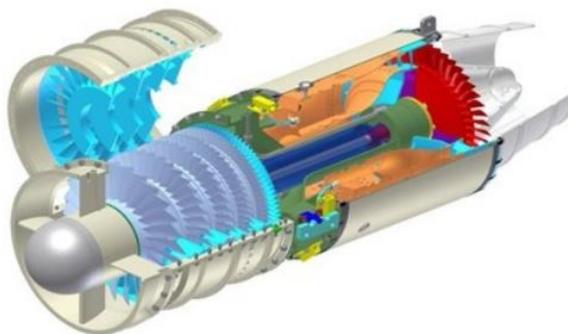


Figura 6. Diseño de un compresor axial como elemento participante de un ciclo Brayton.

Fuente: (de la Fuente, 2010)

2.1.3.2 Turbocompresores

Es un tipo de compresor dinámico donde su forma más habitual es tipo caracol, (Similar a una bomba centrífuga) presenta paletas conocidas como impulsores de rotación permitiendo así comprimir un gas en vez de usar otros elementos como anillos o pistones (Bitzer, 2017), una de sus principales características es su aplicabilidad en vehículos de alta velocidad, donde es pieza fundamental de los turbo-cargadores sin mencionar que es muy silencioso y de bajo consumo energético, siendo muy apetecido en los sistemas de refrigeración y unidades de aires acondicionados con clasificación energética A.

Una de sus principales desventajas es la necesidad de suministrar aire o fluido “Limpio” es decir, con baja o nula suciedad, debido a la vulnerabilidad presente en sus elementos que pueden fallar fácilmente por el ingreso de agentes no deseados especialmente el sílice, polvo y pequeñas partículas de polvillo, es por ello por lo que se aplica una serie de filtros especiales que continuamente deben ser limpiados o reemplazados para evitar una disminución en el rendimiento del compresor.

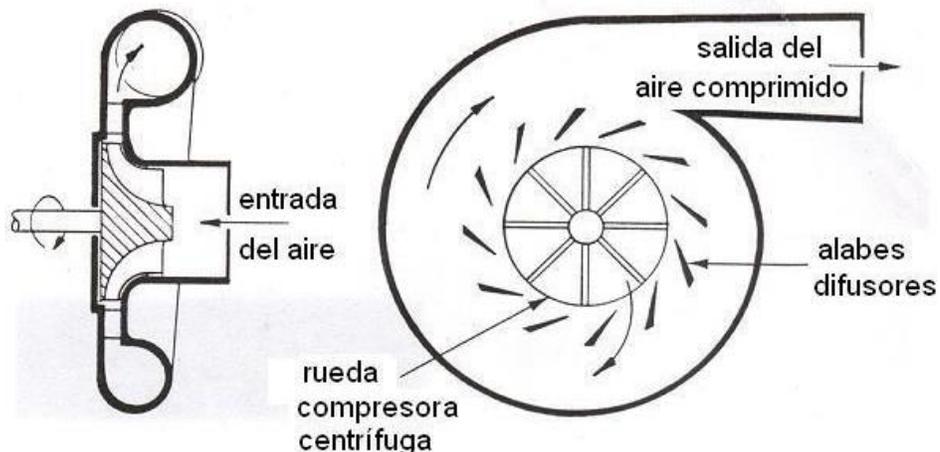


Figura 7. Diseño y bosquejo de un compresor tipo turbocompresor.

Fuente: (Bitzer, 2017)

2.1.4 Compresores de desplazamiento positivo.

Son los tipos de compresores más utilizados y conocidos, cuya característica principal es enfocada en reducir el volumen del fluido en una cámara a la hora de aplicar un trabajo mecánico incrementado así la presión de este. En la actualidad existen dos clasificaciones definidas como alternativos y rotativos denominados de la siguiente manera:

- De paletas
- Excéntrica
- Scroll
- Screw

En el siguiente texto solo se hará énfasis en los tipos Screw y Scroll debido a su importancia, característica, aplicabilidad en refrigeración y al enfoque de estudio de este documento.

2.1.4.1 Compresores tipo Screw

Su principal característica es que está formado por dos tornillos (Engranajes) donde se cumplen algunas etapas, la primera etapa conocida como aspiración se logra cuando el fluido ingresa a la entrada del compresor, llenando así todos los espacios presentes entre los lóbulos, los alveolos y la carcasa. La segunda etapa se logra cuando surge la rotación de los engranajes internos logrando así un aumento en la longitud del espacio presente entre el lóbulo, los alveolos y la carcasa; en la etapa final se logra la compresión donde se ha logrado disminuir el volumen del fluido debido al aumento de longitud, pero teniendo presente que dicha disminución origina el aumento de presión, permitiendo así descargar el fluido hasta que el espacio desaparece definitivamente. En la Figura 8 se logra apreciar el proceso de funcionamiento, aspiración y descarga del compresor.

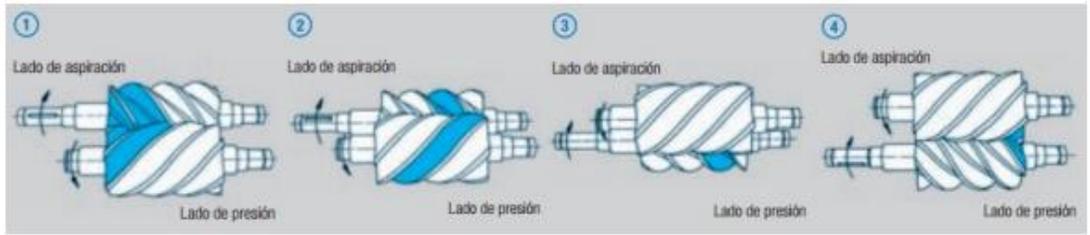


Figura 8. Funcionamiento de un compresor tipo turbocompresor.

Fuente: (Robison & Beaty, 2000)

En la práctica existen dos tipos de compresores Screw, los mono-tornillo y los doble-tornillos, cabe mencionar que su diferencia radica en que el mono-tornillo presenta un rotor helicoidal y dos engranajes satélites situados de manera perpendicular al eje del tornillo, mientras que el doble-tornillo es como el ilustrado en la Figura 8 donde no existen engranajes satélites si no dos engranajes helicoidales.

Una ventaja fundamental es que los doble-tornillo son más simples, económicos y de alta resistencia, mientras que los mono-tornillo son para compresiones más ligeras y ocurren fugas del fluido en muchos casos por un desajuste ocurrido en los engranajes satélites, es por lo que los doble-tornillo son actualmente los más conocidos y aplicados. (Robison & Beaty, 2000)

2.1.4.2 Compresores tipo Scroll

Los compresores tipo Scroll son quizás los sistemas más típicos, básicos y más conocidos en procesos de compresión ya que una de sus grandes aplicaciones es en el sector de la refrigeración de baja, media y alta temperatura; a su vez su principal ventaja es su trabajo silencioso siendo quizás el compresor con menor cantidad de ruido generado por lo que es muy apetecido y estudiado a nivel ingenieril. (Robison & Beaty, 2000)

El funcionamiento de un compresor tipo Scroll es muy simple, básicamente presenta y/o está conformado por un espiral móvil y otra fija, montados con un desfase de 180°, de modo que el espiral móvil realiza su movimiento ondulatorio sobre el fijo, garantizando cámaras de compresión que permiten la aspiración del fluido y progresivamente ese

volumen se va reduciendo de modo que aumenta la energía debido a la presión, donde finalmente se concentra toda esa energía es en el centro, donde está ubicado el orificio de descarga, estos movimientos oscilatorios desplazan el fluido hacia el centro permitiendo así el ciclo de compresión de vapor, una manera de comprender su funcionamiento es por medio de la siguiente imagen.

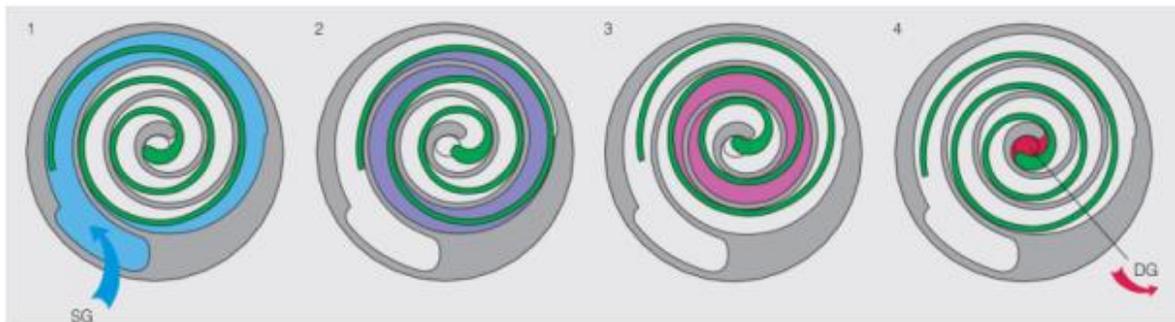


Figura 9. Funcionamiento principal de un compresor Scroll.

Fuente: (Robison & Beaty, 2000)

Actualmente los rangos de potencia y/o de trabajo de estos dispositivos se sitúa entre 0.74 a 50 kW (1 hp a 70 Hp) y se pueden encontrar herméticos, es por ello que su principal aplicación es en aires acondicionados (Robison & Beaty, 2000).

Mencionando otras características y/o ventajas, se resalta el excelente rendimiento volumétrico, quizás uno de los más altos de los tipos de compresores; se destaca también la inexistencia de espacio muerto que origina pérdida de energía adquirida por el fluido, también su múltiple adaptabilidad axial y radial, alta confiabilidad operativa y técnica, igualmente su bajo consumo energético a un trabajo continuo y quizás la principal es su baja vibración y sonido funcional.

En aspectos negativos catalogados como desventajas es principalmente enfocado en su fabricación donde actualmente los compresores Scroll son de gran tamaño y/o peso, siendo pocos prácticos para su transporte e instalación, a su vez son muy sensibles a impactos y/o movimientos por lo que no se recomienda instalarlos en vehículos, y en aspectos operativos las presiones de descarga obtenidas son menores si son comparadas con otros sistemas de compresión.

En la selección de compresores Scroll es necesario tener presente no solo la aplicación, si no el tipo de refrigerante, temperaturas de trabajo, capacidad térmica deseada, voltaje, amperajes y presiones (Robison & Beaty, 2000; San Juan, 2015), como todo equipo mecánico es necesario el diagnóstico y seguimiento para aprovechar al máximo su vida útil, de modo que el costo de operación y mantenimiento sea lo más bajo posible.

En el caso de los compresores Scroll su principal mantenimiento es enfocado en lo preventivo y/o predictivo para identificar sus condiciones operacionales y lo principal es quizás su cantidad de aceite interno, siempre se debe garantizar que la cantidad de aceite que es expulsado por la descarga regrese por la línea de aspiración de modo que se mantenga el nivel operativo.

En aspectos correctivos no aplica, debido a que dichos compresores son catalogados como desechables y son herméticos, una vez que algún componente interno falla, no se recomienda repararlo, sino reemplazar el compresor por otro nuevo. (San Juan, 2015)

Las fallas más típicas y/o conocidas en los compresores Scroll radica en general, fallas eléctricas por sobrevoltajes, afectando los elementos eléctricos presentes en el compresor como el caso de su embobinado, condensador, capacitores y kit de arranque, los cuales en muchos casos pueden ser reemplazados debido a que son elementos ubicados al exterior del sello hermético del sistema, pero en sus fallas catalogadas como mecánica la más típica es por ruptura de ejes debido al ingreso de refrigerante en estado líquido, ocasionando rupturas de la espira móvil como se observa en la siguiente figura.



Figura 10. Ruptura de la espiral interna del compresor

Fuente: (San Juan, 2015)

Estos daños mecánicos no pueden ser reparados y es necesario cambiar el compresor por uno nuevo, pero con un buen mantenimiento, diagnóstico y seguimiento al equipo se pueden evitar. En la actualidad el inconveniente de los compresores radica en su arranque denominado ON/OFF conocido como todo/nada, en donde el compresor trabaja en su máxima capacidad y se apaga por intervalos de tiempo, todo esto por un proceso de control simple (San Juan, 2015) aunque se ha desarrollado la tecnología INVERTER que no es más que la implementación de un variador de frecuencia programado en el compresor que permite un arranque más suave, paulatino e identifica diversas condiciones de trabajo en función de los requisitos establecidos para su funcionamiento, esto garantiza que el sistema no estará en su máxima capacidad.

2.1.5 Funcionamiento de un compresor

Como se mencionó anteriormente, en los compresores Scroll y como tal sin importar el tipo o clasificación de compresor, se ha seleccionado el control básico de ON/OFF como base funcional de encendido y apagado del sistema, siendo esto un sistema que propicia el derroche energético (Pediapress, 2011) debido al uso innecesario de toda la potencia del compresor sin importar las condiciones operacionales o requeridas y apagado una vez logrado la función objetivo denominado SET-POINT, pero algunos casos existen intervalos

en los cuales el motor eléctrico presente en el compresor no aprovecha la energía suministrada para comprimir el refrigerante como se observa en la siguiente figura, esto genera tiempos muertos en los que también existe derroche de energía, por lo cual es necesario el desarrollo de nuevas alternativas para mejorar el control del sistema mecánico.

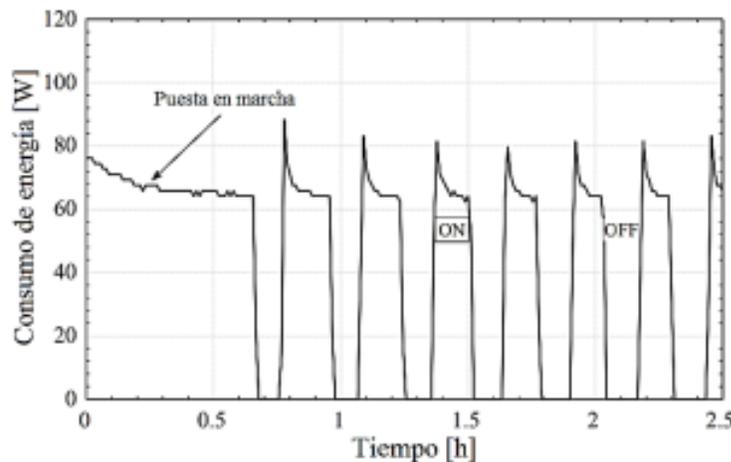


Figura 11. Control ON/OFF de un compresor Scroll

Fuente: (Belman-Flores, Barroso, Rodriguez-Muñoz, & Camacho-Vazquez, 2015)

Un inconveniente que diariamente acompaña a los compresores es que sin importar las condiciones operacionales, térmicas y técnicas, siempre estará funcionando a la misma velocidad durante el tiempo de encendido, y en algunos rangos de tiempo existirá derroche de energía, por ello es importante recolectar la información por medio de programas de diagnóstico para actuar en base a los parámetros y poder controlar el compresor, mejorando su eficiencia energética. (Belman-Flores, Barroso, Rodriguez-Muñoz, & Camacho-Vazquez, 2015)

Como tal la funcionalidad del proceso ON/OFF, es la utilización de un relé con control realimentado, siendo un aspecto no óptimo para regulación de temperaturas para cuartos fríos o alimentos, pero es quizás el método más económico, sostenible y aplicado en hogares e industrias y se puede establecer que dicha operación intermitente del sistema como se observa en la siguiente figura, afecta el consumo energético del compresor limitado su vida útil y a la hora de ser comparado con tecnologías más modernas como la

INVERTER, se evidencia que con la mitad de la velocidad nominal del compresor se obtiene mejoras de un 12% (Pediapress, 2011; Belman-Flores, Barroso, Rodriguez-Muñoz, & Camacho-Vazquez, 2015) en la eficiencia de demanda energética con respecto al sistema convencional actualmente vigente.

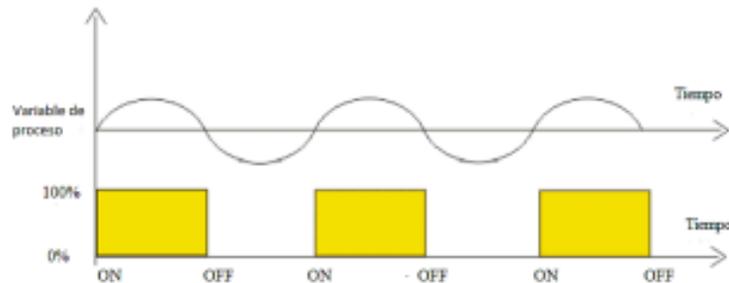


Figura 12. Control ON/OFF de un compresor Scroll

Fuente: (Belman-Flores, Barroso, Rodriguez-Muñoz, & Camacho-Vazquez, 2015)

Es por ello por lo que se ha desarrollado estudios de viabilidad, rentabilidad y aplicación de tecnología INVERTER, que no es más que un variador de frecuencia que acorde a unas condiciones, selecciona los aspectos marchantes del compresor para garantizar condiciones óptimas de trabajo y generando ahorro energético, pero lo fundamental es siempre garantizar condiciones operacionales requeridas por el sistema, de modo que el compresor pueda trabajar y aprovechar al máximo su vida útil.

2.4 Análisis termodinámico de compresores

En el análisis termodinámico del compresor es necesario una caracterización desde un punto de vista matemático, de modo que sea posible cuantificar su operación y servicio. Es importante establecer la potencia absorbida por el refrigerante al momento de la compresión, debido a la necesidad de estimar la potencia o trabajo absorbido por el fluido o refrigerante del trabajo, cuyo modelo matemático es mostrado a continuación:

$$W_c = m_f(h_2 - h_1)$$

Ecuación 1

Donde:

- W_c : Es el trabajo experimentado por el fluido
- m_f : Es el flujo masico del sistema cerrado.
- h_1, h_2 : Se definen como las entalpias de entrada y de salida del compresor respectivamente

Recordemos que en el diagrama de Presión-Entalpia de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor es ilustrado en la siguiente imagen:

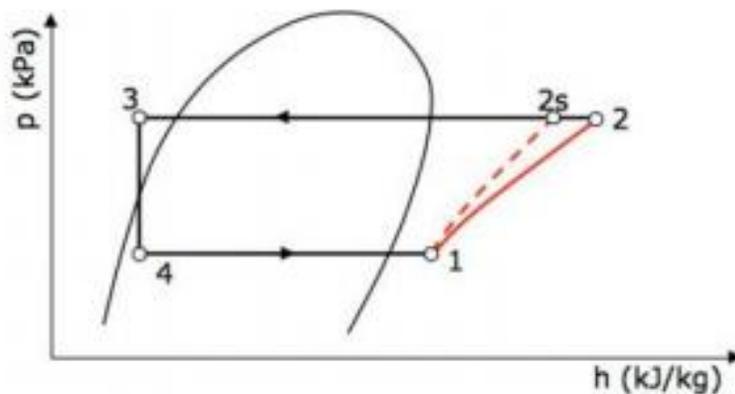


Figura 13. Diagrama Presión-Entalpia con compresión real e isentrópico.

Fuente: (Belman-Flores, Barroso, Rodriguez-Muñoz, & Camacho-Vazquez, 2015)

Este es un punto de partida para el análisis y caracterización no solo de los compresores sino de todos los elementos existentes del ciclo, permitiendo conocer las potencias de trabajo, igualmente es importante conocer el rendimiento isentrópico del compresor definido por la siguiente formulación:

$$n = \frac{W_{cs}}{W_c} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- W_{cs} : Es el trabajo isentrópico del compresor.
- $H2s$: Es la entalpia de salida del compresor en función de condiciones isentrópicas.

Otro aspecto esencial e importante es la estimación del rendimiento volumétrico definido como la relación existente entre el refrigerante o fluido desplazado y el desplazamiento volumétrico realizado teóricamente por el compresor, entonces:

$$n_v = \frac{m_t * V_l}{V_t} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- V_l : Es el volumen de refrigerante desplazado
- V_t : Es el volumen de refrigerante desplazado teóricamente.

En algunos casos es importante cuantificar y conocer el rendimiento volumétrico debido a la necesidad de establecer la relación de presiones y el diseño volumétrico del compresor, a su vez es importante resaltar que una estrategia de diseño y caracterización de compresores es establecer una compresión ideal y/o perfecta de modo que los rendimientos isentrópicos y volumétricos sean iguales a 1.

2.1.6 Modelados matemáticos de compresores

A nivel industrial los modelados y/o caracterización de un compresor es realizado por el método de mapas y de eficiencia, que básicamente es una caracterización de fabrica establecida en tablas por los fabricantes; como tal el método de mapa consiste en ajustar y/o regular el flujo masico del refrigerante de modo que aplicando la norma AHRI 540 es posible estimar flujo y potencia en función de temperatura (Shao, Shi, Li, & Chen, 2004) teniendo presente ciertos coeficientes adimensionales, por su parte el método de

eficiencia es un poco más simple donde es necesario conocer la temperatura de condensación y de evaporación de modo que usando tablas de refrigerantes se conoce las entalpías del refrigerante y por ende es posible calcular la capacidad de enfriamiento e identificar el COP.

El modelo matemático de un compresor de velocidad constante es similar a un compresor inversor, la única diferencia radica en los coeficientes adimensionales, los cuales son mencionados y/o establecidos en la norma AHRI 540 (Shao, Shi, Li, & Chen, 2004) en resumen se establece que para estimar la potencia y flujo se aplica:

$$m = a_1TC^2 + a_2TC + a_3TC TE + a_4TE^2 + a_5TE + a_6 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$P = b_1TC^2 + b_2TC + b_3TC TE + b_4TE^2 + b_5TE + b_6 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- m : Es el flujo masico en Kg/h
- P : Potencia suministrada al refrigerante (w)
- $a_1 - a_6$: constante de proporcionalidad establecida por el fabricante
- $b_1 - b_6$: constante de proporcionalidad establecida por el fabricante

Igualmente es fundamental en el proceso de diagnóstico y diseño el coeficiente de operación (COP) que es obtenido tomando la capacidad de enfriamiento y dividiéndola sobre la entrada de potencia del compresor, de modo:

$$COP = \frac{Q}{P_c} = \frac{m\Delta H}{3.6 * P} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- ΔH : Cambio de entalpia.

- m : Es el flujo masico en Kg/h
- P : Potencia suministrada al refrigerante (w)
- P_c : Potencia del compresor

2.2 Estado del arte

Las investigaciones acerca de herramientas que realicen un análisis y diagnóstico de compresores que funcionen de manera convencional es poco numerosa y con poca información revelada. Por lo tanto, esta investigación va enfocada a diseñar una herramienta computacional que examine, analice y diagnostique energéticamente compresores. Teniendo en cuenta lo anterior, se han tomado como referencias trabajos de investigación realizados para determinar ventanas de procesos de trabajo y enriquecer la información acerca de herramientas y trabajos que diagnostiquen compresores.

Auté, Virkant and Martin, Cara en el trabajo “A Comprehensive Evaluation of Regression Uncertainty and the Effect of Sample Size on the AHRI-540 Method of Compressor Performance Representation” (Aute & Martin, 2016), realizaron una investigación de un método estandarizado que mide los datos de rendimiento de un compresor los cuales se ven afectados por diferentes incertidumbres como la medición, la predicción de polinomio, la variación del compresor entre otras. Inicialmente realizaron un análisis estadístico de regresión de la incertidumbre. Adicionalmente hicieron un estudio de muestreo teniendo en cuenta diferentes tamaños de muestras y múltiples métodos. Finalmente, en temas metodológicos, realizaron una evaluación mediante el método de muestreo que utiliza el diseño de muestreo de hipercubo latino (LHS) y un método de muestreo alternativo propuesto basado en el diseño poligonal de experimentos (PDOE).

Como resultados los investigadores hallaron:

- Los resultados mostraron que la incertidumbre promedio en la predicción del caudal másico puede llegar al 4% y que en la predicción de la potencia puede llegar al 5%. El error en la potencia prevista y el caudal másico es mayor para los compresores de mayor capacidad.
- Los modelos resultantes fueron validados con un conjunto de datos medidos de más de 600 puntos que abarcaban el entorno operativo de cada compresor. En general, tanto el método LHS (Figura 14) como el PDOE arrojaron errores similares en el caudal másico para tamaños de muestra de 12, 14 y 16. Por tanto, para el caudal másico, es posible construir un modelo con 12 puntos de prueba seleccionados sistemáticamente. Para la predicción de potencia, el error promedio para los métodos LHS y PDOE que utilizan el estándar AHRI 540 y otros dos métodos fue inferior al 2% para todos los tamaños de muestra.

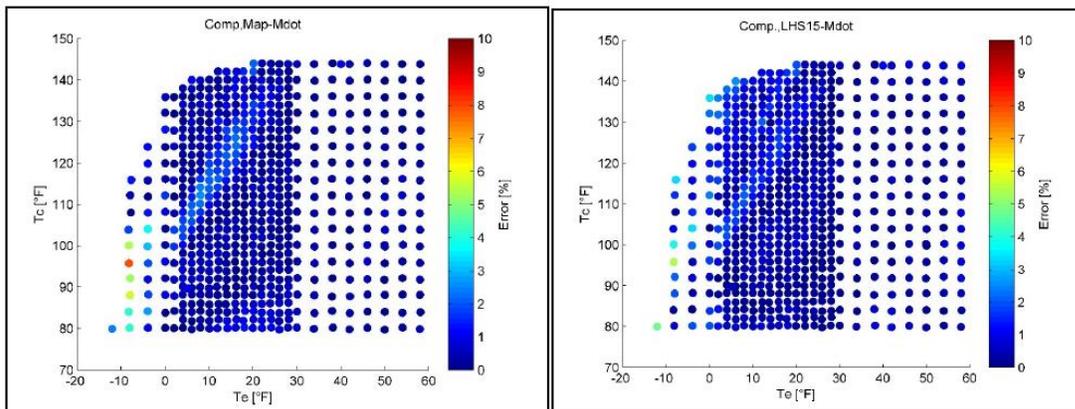


Figura 14. Comparación de errores en la tasa de flujo másico pronosticado para datos de mapas frente a muestras LHS

Fuente: (Aute & Martin, 2016)

En el trabajo de investigación realizado por Cavazzini, et al. que lleva por nombre “*CFD based optimization of scroll compressor design and uncertainty quantification of the performance under geometrical variations*” (Cavazzini, y otros, 2020) propusieron una estrategia de diseño dirigida a maximizar la eficiencia del compresor tipo Scroll mediante

la optimización de la topología. Metodológicamente optimizaron los parámetros mediante Particle Swarm Optimization (PSO) integrado con Computational Fluid Dynamics (CFD) para lograr la máxima eficiencia. Posteriormente, evaluaron la influencia de estos parámetros en el rendimiento de la máquina, también se utilizó un enfoque de Diseño de Experimento (DOE). Como resultados obtuvieron:

- Los modelos evaluados PSO (Particle Swarm Optimization) investigó mediante Computational Fluid Dynamics (CFD) su influencia en el rendimiento de la máquina resultante y optimizó sus valores para lograr la máxima eficiencia de desplazamiento.
- De seis (6) parámetros investigados, solo tres (3) de ellos han mostrado un impacto importante en el rendimiento de la máquina: el radio de órbita, el número de vueltas y el tamaño del puerto de descarga.
- El área de alta eficiencia encontrada en el trabajo actual tiene dos aspectos positivos. El primero está relacionado con la planitud de la superficie de respuesta cercana al BEP. El segundo es el hecho de que esta área es también la menos sensible a pequeñas variaciones de insumos en términos de imprecisión de fabricación.
- Finalmente consideraron realizar una optimización más fina considerando diferentes geometrías centrales, así como modificaciones 3D más complejas.

En el trabajo realizado por Arencibia, Karen y Triccio, Veronica (Arencibia & Tricio, 2014) que lleva por nombre “Evaluación Experimental de Compresores Herméticos en Condiciones de Clima Tropical. Eficiencia y Capacidad Frigorífica” estudiaron el comportamiento de la capacidad frigorífica y la eficiencia de los compresores herméticos en clima tropical. Metodológicamente realizaron un estudio experimental de compresores herméticos a temperaturas ambientes de 35 y 38 °C y luego fueron comparados con las obtenidas según las condiciones de pruebas estándar ASHRAE y CECOMAF. Para el desarrollo se usaron tres compresores herméticos para determinar los parámetros termodinámicos con la herramienta calorímetro a fluido secundario y se realizó la prueba de marcha acelerada para conocer los desgastes mecánicos de los grupos constructivos.

Como resultado se observa lo siguiente:

- Para la capacidad frigorífica los resultados arrojaron que entre los valores obtenidos del ensayo calorimétrico antes y después de la prueba de marcha acelerada no existen diferencias significativas, teniendo en cuenta las condiciones de pruebas ASHRAE y CECOMAF.

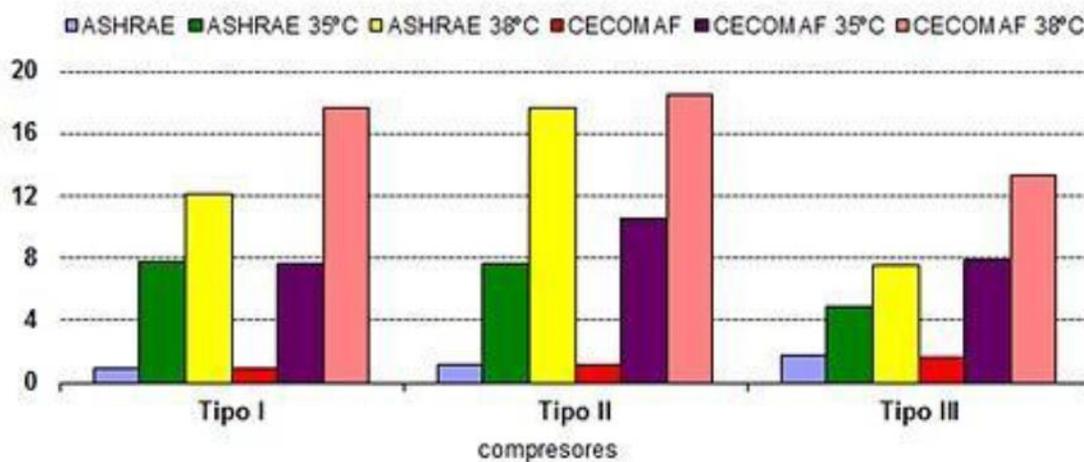


Figura 15. Comportamiento de Q_0 en condiciones ASHRAE, CECOMAF y PROPUESTAS

Fuente: (Arencibia & Tricio, 2014)

- En términos de eficiencia los investigadores hallaron que los tres tipos de compresores para la condición 38 °C, con subenfriamiento (ASHRAE) tienen una disminución del COP por encima del 7 %. Esta disminución es mayor cuando se evalúa para la misma condición, pero sin subenfriamiento (CECOMAF), alcanzando valores máximos para el compresor hermético Tipo I de 14,10%, Tipo II de 15, 44 % y Tipo III de 13,02%.

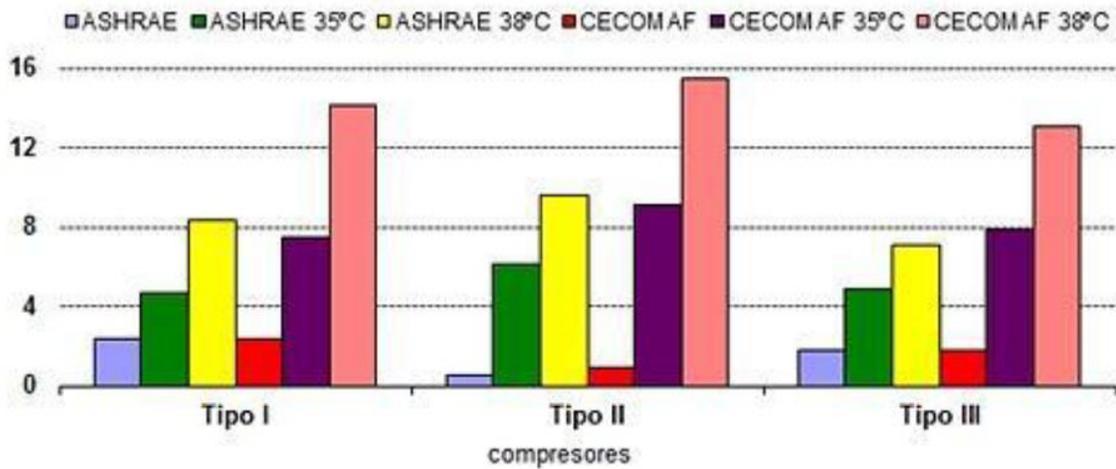


Figura 16. Comportamiento del COP en condiciones ASHRAE, CECOMAF y PROPUESTAS.

Fuente: (Arencibia & Tricio, 2014)

- Los ensayos de marcha acelerada mostraron que ninguno de los compresores presentó desgaste mecánico intenso. En términos generales, señalaron que en el sistema de válvulas del compresor Tipo I aparecieron depósitos de cobre en forma de nido, formación de diminutas superficies de desgastes que sobresalen del espejo de rodamiento presentando un desgaste moderado.

3 Capítulo 3 – Metodología y resultados

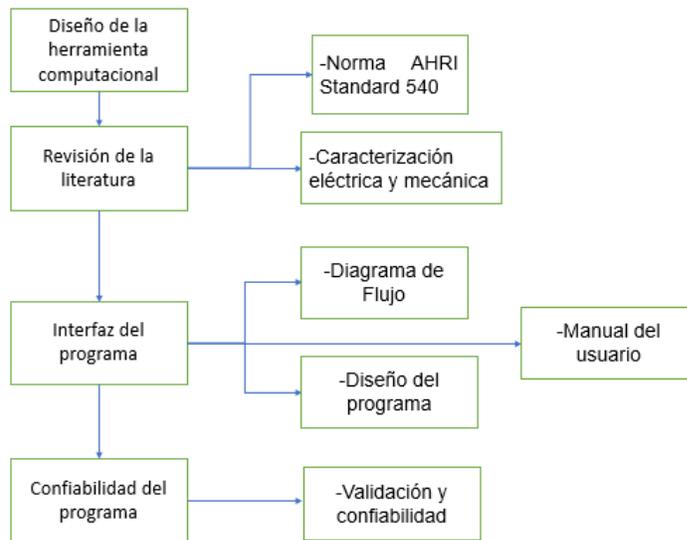
3.1 Metodología

La investigación desarrollada en este proyecto va enfocada a un tipo exploratorio-correlacional, debido al impacto e importancia de las variables estudiadas que afectan directamente las condiciones operacionales, técnicas y energéticas de los compresores tipos scroll, además de la necesidad de desarrollar y validar una herramienta computacional encaminada analizar y diagnosticar estos tipos de elementos mecánicos bajo un aspecto de carácter no invasivo.

Esta investigación presenta un enfoque cuantitativo, gracias a la relación existente entre las variables a estudiar con leyes, planteamientos físicos y normativas establecidas como en el caso de la AHRI Standard 540 permitiendo así caracterizar operacional y energéticamente estos tipos de compresores con el fin de proporcionar toda la información técnica y operacional necesaria para determinar la eficiencia, consumo, potencias, costos operativos y condiciones de trabajo del sistema. Cabe mencionar que la investigación trabajada un diseño plenamente experimental debido a la necesidad de validar y estimar la confiabilidad de la herramienta computacional para el análisis y diagnóstico energético de compresores scroll aplicando un enfoque no invasivo por medio de la observación y análisis de casos plasmados en la literatura y establecer una guía de usuario que mencione la pautas de uso y adquisición de datos cuantitativos para finalmente obtener pautas de rendimiento de equipo, consumo, potencias, ahorro energético, entre otras.

En general el esquema metodológico de trabajo es evidenciado en la siguiente figura, esta permite establecer el proceso de revisión de la literatura, diseño de interfaz y características del programa y finalmente su validación para determinar su confiabilidad.

Figura 17. Esquema metodológico de trabajo



Fuente: Autores

En el esquema mostrado en Figura 17 se observa el paso a paso a seguir para el diseño de la herramienta computacional iniciando con una revisión de la literatura enfocado en caracterizar desde un punto de vista operativo, energético y técnico el compresor, seguido de un diseño computacional usando la herramienta MATLAB y finalmente una validación con un caso plasmado en la literatura.

3.1.1 Revisión de la literatura enfocada a compresores scroll

En esta primera fase se busca realizar una revisión de la literatura que permita evidenciar los diversos modelos matemáticos, ecuaciones, normativas y leyes, todo con el objetivo que acceder a información actualizada que permita caracterizar estos tipos de compresores bajo aspectos técnicos, energéticos y operacionales.

3.1.2 Correlaciones para caracterización de Compresores Scroll

Según la norma AHRI Standard 540 (Air-Conditioning, 2015) se han desarrollado unas correlaciones y/o modelos matemáticos que permiten la caracterización de compresores y se establece que los fabricantes deben aportar un modelo para que los usuarios puedan establecer de manera practica y eficaz el trabajo del compresor, el modelo descrito es:

$$X = C_1 + C_2S + C_3D + C_4S^2 + C_5SD + C_6D^2 + C_7S^3 + C_8DS^2 + C_9SD^2 + C_{10}D^3 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- X es el trabajo realizado por el compresor al fluido en W
- C1 a C10 son los coeficientes de regresión otorgados por el fabricante.
- S es la temperatura a la salida del evaporador en °C
- D es la temperatura a la entrada del condensador en °C

La norma AHRI Standard 540 (Air-Conditioning, 2015) fue modificada por los autores Shuangquan Shao, Wenxing Shi, Xianting Li y Huajun Chen para garantizar un modelo denominado AHRI reducido (Shuangquan Shao, 2004) presenta una alta confiabilidad con datos experimentales, haciendo más fácil la caracterización del estos tipos de equipos, definido bajo la siguiente ecuación:

$$X = C_1 + C_2S + C_3D + C_4S^2 + C_5D^2 + C_6SD \quad \text{Ecuación 8}$$

Adicionalmente dichos autores (Shuangquan Shao, 2004) desarrollaron ciertos modelos que permiten estimar en función de la temperatura de condensación y evaporación la potencia de ingreso y el flujo masico del refrigerante, de modo que son expresados de la siguiente forma:

$$M = a_1D^2 + a_2D + a_3SD + a_4D^2 + a_5D + a_6 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$P = b_1D^2 + b_2D + b_3SD + b_4D^2 + b_5D + b_6 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- M es el flujo masico del refrigerante en kg/h
- P es la potencia de ingreso necesaria a las condiciones de temperatura (W)
- $a_1 - a_6$ y $b_1 - b_6$ son constantes de regresión otorgadas por el fabricante

Las constantes $a_1 - a_6$ y $b_1 - b_6$ se pueden evidenciar en la siguiente tabla donde algunos fabricantes mencionan sus constantes para caracterizar sus equipos.

Tabla 1. Valor de diversas constantes para la caracterización del compresor.

	Compresor 1 (MITSUBISHI)	Compresor 2 (SANYO)	Compresor 3 (HITACHI)
a1	-0,00047987	-0,0019397	-0,0059681
a2	-0,3581	-0,037124	0,3301
a3	-0,00947	-0,00078361	-0,0024303
a4	0,044282	0,018225	0,033835
a5	3,3256	1,6186	2,06
a6	93,418	51,302	46,007
b1	0,060975	0,0037275	0,068257
b2	14,226	15,457	9,0473
b3	0,40058	0,11382	0,26956
b4	-0,17079	-0,1467	-0,12363
b5	-12,514	-3,2375	-9,76
b6	408,91	31,643	416,89
c1	1,4834E-05	-0,000017509	-9,44859E-05
C2	0,0187535	0,0184918	0,0145697
c3	1,0141	0,998824	0,999998
d1	0,00015985	2,06383E-05	5,22484E-05
d2	0,016746	0,00171603	0,0154208
d3	0,95675	0,995598	1

Fuente: (Shuangquan Shao, 2004)

Es necesario resaltar que X es el trabajo efectuado por el compresor, es decir, es el trabajo que experimenta el fluido; pero como tal, ese no es el consumo energético del compresor, el cual es un dato de interés para el análisis energético, es importante también recordar que los compresores tipo scroll son ensamblados con motores monofásicos, bifásicos y trifásicos, pero en la gran mayoría de casos son monofásicos y trifásicos (Carmona, 2019). siendo el motor monofásico el más conocido y aplicado en refrigeración, éste se considera un motor de inducción con dos bobinas en el estator, sus principales partes y elementos están presentes en la figura 18.

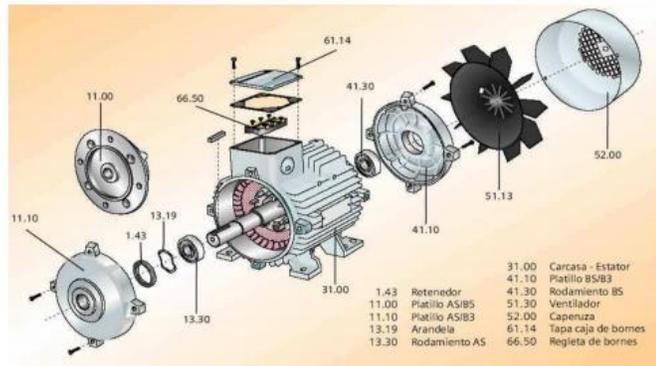


Figura 18. Partes y elementos de un motor eléctrico

Fuente: (Aller, 2008)

Para calcular la potencia de entrada del compresor es necesario conocer los voltajes y amperajes de alimentación de este, de modo que se puede aplicar la siguiente ecuación que permite estimar la potencia de entrada o la consumida por el compresor, de modo que:

$$P_E = \sqrt{3} * I * V \tag{Ecuación 11}$$

Donde:

- P_E es la potencia de entrada
- I es la intensidad eléctrica presente en la fase.
- V es la tensión eléctrica presente en la fase.

Otros aspectos eléctricos para tener presente son: La velocidad de rotación del campo eléctrico presente en la bobina del motor eléctrico, denominada velocidad síncrona, la cual es posible calcular bajo la siguiente formulación:

$$N_s = \frac{120 F}{P_o} \qquad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- N_s hace referencia a la velocidad síncrona expresada en rpm.
- P_o es el número de polos
- F es la frecuencia del sistema expresada en Hz

El voltaje presente en el rotor es función del campo magnético y de la velocidad del rotor por lo tanto existe una variable llamada deslizamiento (Harper, 2002) definida como:

$$N_{des} = N_s - N_m \qquad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

- N_{des} es la velocidad deslizamiento.
- N_m es la velocidad mecánica.
- N_s hace referencia a la velocidad síncrona expresada en rpm.

Generalmente el deslizamiento por facilidad de comprensión se expresa en porcentaje, entonces:

$$S = \frac{N_{des}}{N_s} * 100\% \qquad \text{Ecuación 14}$$

Esto permite expresar la velocidad mecánica en función del deslizamiento:

$$N_w = (1 - s)N_s \quad \text{Ecuación 15}$$

Por su parte un motor trifásico es ampliamente usado para trabajos de alta potencia como grúas, compresores industriales, chiller, ventiladores entre otros elementos mecánicos (Corporación, 2019) gracias a su pequeño tamaño y torque, en comparación con un motor monofásico.

Un análisis realizado por los autores R. Figura, E. Szychta, L. Szychta en su artículo publicado "In-Service Efficiency Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor" (R. Figura, 2014) establecen una metodología para el cálculo del torque entre hierro de un motor trifásico de modo que es posible conocer el torque originado y que es transmitido al fluido pero es necesario la estimación de la eficiencia del motor, de modo que se establece una relación mecánica de salida P2 obtenida en el eje y la potencia absorbida por la inducción del motor P1, de modo que es posible establecer la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P2}{P1} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- P2 es la potencia de salida recibida por el fluido
- P1 es la potencia de inducción proveniente de una fuente eléctrica.

Es necesario establecer que dicha formulación presenta algunas suposiciones que facilitan el proceso de análisis y cálculo de la eficiencia, algunas de ellas son:

- El motor es un receptor Lineal
- Los voltajes de las fases son sinusoidales
- Los bobinados del estator son simétricos y del rotor son trifásicos
- La potencia de salida de las fases presente es simétrica.

El valor de la potencia P1 puede ser determinada por la medición de los valores instantáneos de tensión y corrientes presentes en las fases del motor, para ellos es necesario el uso de instrumentos de medición como pinzas voltiamperimetricas y/o

voltímetros, de modo que al obtener dichas variables la potencia del motor P1 es estimada por la siguiente formulación:

$$P_1 = u_U i_U + u_V i_V + u_W i_W \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- u Hace referencia a la tensión de cada línea
- i Hace referencia al amperaje presente en cada línea.

Es necesario resaltar o mencionar que una conexión trifásica sin punto neutral se cumple con la ley de las corrientes y de los voltajes planteadas por Kirchhoff (Pérez, 2015) de modo que se debe cumplir:

$$i_U + i_V + i_W = 0 \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\vec{u}_u + \vec{u}_v + \vec{u}_w = 0 \quad \text{Ecuación 19}$$

Para el cálculo de la potencia de salida se establece una formulación muy simple, pero el cálculo del torque del eje es quizás un reto en este caso, debido a la limitación de realizar la medición de este, recordado que el desarrollo como tal de este proceso es de carácter no invasivo. La potencia P2 es calculada:

$$P_2 = \frac{2\pi T n}{60} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

- T es el torque del rotor
- n es la velocidad del rotor

La variable n expresada anteriormente es la obtenida con el termino N_s

El método propuesto (R. Figura, 2014) elimina la dificultad del cálculo o estimación del torque del rotor T debido al desarrollo de un modelo matemático que presenta una alta exactitud y mejora debido al cálculo o estimación de pérdidas de potencia presentes en el motor de inducción y es por ello por lo que es clasificado como un método no invasivo que permite determinar la potencia P_2 .

El torque del eje del motor puede ser calculado como la diferencia entre la potencia de entrada del motor y el total de perdidas resumidas en dos muy principales denominadas perdidas por fricción y viento (P_m) y perdidas por cargas parasitas del rotor (P_{dodr}).

Finalmente es posible calcular la potencia P_2 con la siguiente expresión:

$$P_2 = \frac{2\pi T_{ag} n}{60} - (\Delta P_m + \Delta P_{dodr}) \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

- T_{ag} es el torque entre hierro presente en el motor eléctrico.

Para la determinación del torque entre hierro, se desarrolló una ecuación integral plasmada a continuación:

$$T_{ag} = \sqrt{3}p \left[i_V \int \left(\frac{u_{UV} - u_{WU}}{3} - R_s i_U \right) dt + i_U \int \left(\frac{2u_{UV} + u_{WU}}{3} + R_s i_V \right) dt \right] \quad \text{Ecuación 22}$$

Ahora para el cálculo de las perdidas por fricción y viento, se estableció que corresponde a 1.2% de la potencia de salida nominal, y para el cálculo de las perdidas por cargas parasitas es necesario mencionar la IEEE standard 112 (Committee, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004) que, por medio de la potencia del motor, establece el porcentaje de pérdida como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 2. Valores experimentales para cargas parasitas según IEEE STANDARD 112.

Machine rating		Stray-Load Loss Percent Rated Output Power
1-125 hp	1-90 KW	1,80%
126-500 hp	91-375 KW	1,50%
501-2499 hp	376-1850 KW	1,20%
2500 hp and up	1851 KW and up	0,90%

Fuente: Autores

3.1.3 Calculo y minimización del trabajo del compresor

Existen tres formas mediante la cual se puede comprimir un fluido (Alfredo Echeverria, 2013) la primera es conocida como isotérmica (Aumento de presión a temperatura constante), la segunda es adiabática (No existe transferencia de calor al medio o entorno) esto posibilita la existencia de dos tipos de energías: la neumática y la térmica; a nivel industrial resulta ser el proceso más económico, pero no el más eficiente y finalmente el proceso politrópico, que es aquella intermedia entre la isoterma y la adiabática, como se observa en la Figura 19.

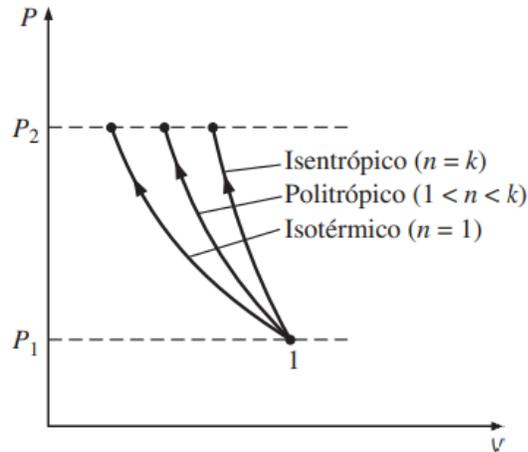


Figura 19. Diagrama P-v de un proceso Isentrópico, Politrópico e isotérmico

Fuente: (Cengel, 2012)

Sin importar el tipo de forma de compresión descrita para el cálculo del trabajo es necesario resolver la siguiente integral:

$$W_{rev} = \int_1^2 V dP \quad \text{Ecuación 23}$$

Es necesario suponer que el proceso se ejecuta entre los mismos niveles de presión P₁ y P₂ de una forma internamente reversible, su comportamiento es como un gas ideal y con calores específicos constantes (Alfredo Echeverria, 2013) (Cengel, 2012) de modo que las formulaciones para los tres procesos son establecidas de la siguiente manera:

Para un proceso politrópico:

$$W_{compresor,entrada} = \frac{kR (T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{nRT}{n - 1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 24}$$

Para un proceso isotérmico:

$$W_{compresor,entrada} = RT \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad \text{Ecuación 25}$$

Para un proceso Isentrópico:

$$W_{compresor,entrada} = \frac{kR (T_2 - T_1)}{k - 1} = \frac{kRT}{k - 1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 26}$$

Está claro que es necesario enfriar un gas cuando está comprimiéndose porque esto reduce el consumo energético del compresor pero en algunos casos no es posible debido al diseño y características del compresor (Alfredo Echeverria, 2013) es por ello que se ha diseñado una técnica conocida como compresión en etapas múltiples con Inter enfriamiento que consiste en comprimir un gas en diversas etapas y enfriarlo en un intercambiador llamado Inter enfriador, en la siguiente figura se observa el funcionamiento de un compresor con dos etapas con Inter enfriamiento.

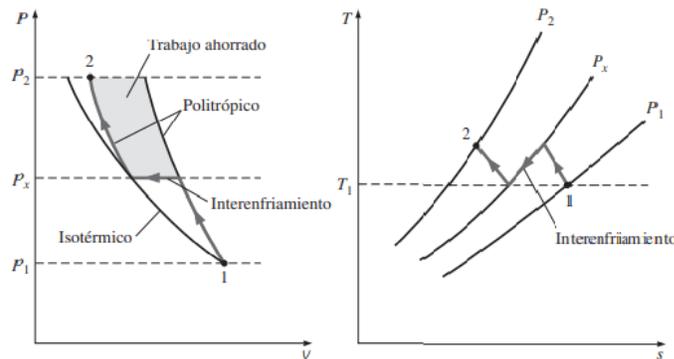


Figura 20. Diagrama P-v y T-s de un proceso con Inter enfriamiento

Fuente: (Cengel, 2012)

Una condición que se debe cumplir para garantizar la minimización del trabajo del compresor es que la relación de presiones para cada etapa del compresor debe ser la misma entonces esto llega a satisfacer la condición que:

$$W_{comp I entrada} = W_{comp II entrada}. \quad \text{Ecuación 27}$$

Una vez conocido y establecido esto es necesario el cálculo de la eficiencia isentrópica del compresor que relaciona el trabajo requerido para elevar la presión de un gas a un valor definido y el trabajo actual del compresor de modo:

$$n_c = \frac{W_s}{W} = \frac{H_{2s} - H_1}{H_{2a} - H_1} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

- H1 es la entalpia a la entrada del compresor.
- H2a es la entalpia a la salida del compresor.
- H2s es la entalpia del compresor a una condición isentrópica.

El proceso isentrópico y el real están relacionados en la siguiente figura y es importante mencionar que el valor de n_c depende del diseño del compresor y vida productiva del mismo, pero generalmente $0.8 < n_c < 0.9$

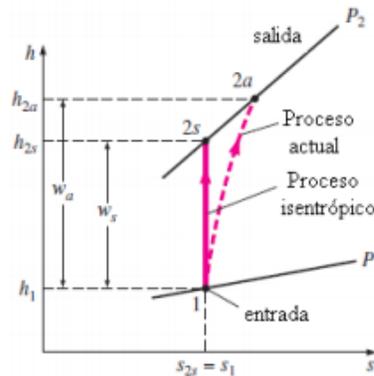


Figura 21. Diagrama h-s de un compresor con proceso real y un proceso isentrópico.

Fuente: (Cengel, 2012)

3.1.4 Interfaz del programa

En esta segunda fase se desea establecer la toma de esas ecuaciones, modelos matemáticos y formulaciones para diseñar por medio del programa MATLAB un programa computacional que por medio de una información permita obtener ciertos resultados que serán de gran ayuda para caracterizar operacional y energéticamente los compresores tipo scroll, para ello es necesario establecer en un diagrama de flujo el proceso de programación y seguimiento del diseño del programa como se observa en la siguiente imagen.

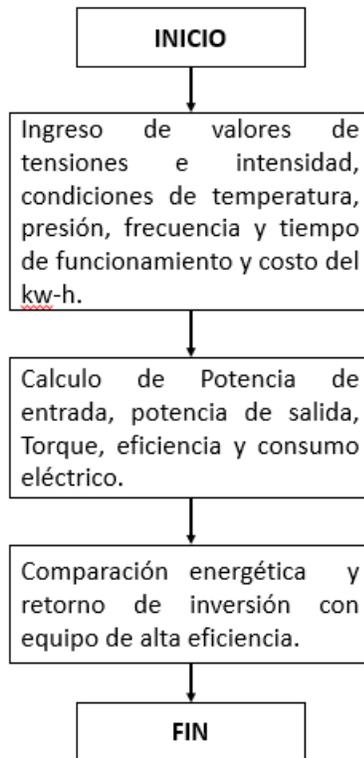


Figura 22. Diagrama de flujo del programa diseñado.

Fuente: Autores

Este diagrama ilustrado en la figura anterior permite conocer e identificar el paso a paso del programa desde una perspectiva general, esto permite definir el orden que se desea originar

en el proceso de cálculo y análisis realizado por el programa computacional, ahora lo importante es trabajar en el proceso de diseño del programa que será mencionado a continuación.

3.1.5 Diseño preliminar de la herramienta computacional

Como primera medida para el diseño de la herramienta es necesario identificar y conocer como adquirir la información del sistema de modo que sea posible cuantificar las variables mencionadas en la figura anterior y para ese caso es necesario el uso de instrumentos de medición para identificar el valor de la tensión, intensidad de la corriente eléctrica, temperaturas y presiones utilizando equipos disponibles por el personal que realizará el diagnóstico, algunos instrumentos son la pinza voltiamperimétrica, voltímetro, termómetros y juego de manómetros de modo que se permita cuantificar y conocer las variables operacionales del sistema, cabe mencionar que dichas informaciones se deben realizar una vez el sistema se encuentre en funcionamiento para que sea catalogada de carácter no invasivo.

En este contexto es importante el uso del programa MATLAB, MATLAB (Requez, 2017) es un programa computacional de programación que ejecuta una gran variedad de operaciones matemáticas que puede manejar y resolver todo tipo cálculos programados, problemas de ingeniería y ciencias exacta, su nombre significa laboratorio de matrices y su principal labor es trabajar con vectores o matrices, dado que MATLAB es quizás el programa de programación más dominante y accesible del mercado se seleccionó como el software para el proceso de programación debido a su facilidad, profundización y ventajas, las cuales básicamente son:

- Es un programa interactivo y gracias a esto no necesariamente se debe crear un código ordenado ni definir variables de forma explícita, solo se recomienda usar las instrucciones sencillas y plasmar los cálculos en forma de vectores y matrices de modo que sea posible obtener una respuesta inmediata. Sin embargo, también es posible crear programas por medio de un lenguaje de alto nivel siendo este aspecto esencial e importante para el desarrollo de la herramienta computacional propuesta.

- Es compatible con otros programas usados en muchas industriales tales como Microsoft Excel permitiendo así compartir información, dividir y disminuir el proceso de cálculo y análisis de los resultados.
- La adquisición y uso de grandes herramientas llamadas toolboxes que permiten graficar y realizar procesos de optimización por medio de redes neuronales, algoritmo genérico y optimización numérica, además el procesamiento de imágenes, videos y el control de procesos. Existe una herramienta importante llamada GUIDE, donde es posible agregar botones, imágenes, ventanas y demás aspectos en el programa que se desea desarrollar, siendo este aspecto el usado para la herramienta computacional.
- La elaboración de programas y aplicaciones que se pueden ejecutar en cualquier computador, dispositivo móvil y con bajos uso de recursos, siendo esto una gran ventaja para el uso, adquisición e instalación de la herramienta computacional.
- Rapidez en el procesamiento de cálculos, permitiendo resolver en pocos segundos cálculos y operaciones que podrían requerir horas, siendo este aspecto un poco dependiente de la capacidad interna del dispositivo.

3.1.6 Confiabilidad del programa.

En esta última pauta se busca establecer el grado de confiabilidad y servicio de la herramienta computacional diseñada, de modo que sea posible establecer el grado de seguridad de los resultados obtenidos, para ello se seleccionó como variables a evaluar la potencia de entrada y potencia de salida del compresor como aspectos de validación del programa.

La confiabilidad va relacionada a la seguridad y rigidez del programa computacional con respecto a los cálculos obtenidos, en el caso de la potencia de entrada, es necesario establecer un caso práctico plasmado en la literatura por otros autores que sirva de parámetro referencial para la herramienta computacional. La siguiente figura muestra como es el proceso de validación y cálculo del error.

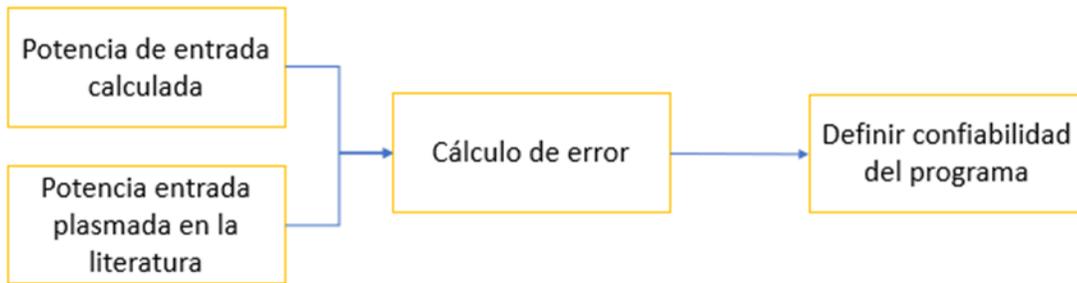


Figura 23. Diagrama de cálculo de error de la potencia de entrada.

Fuente: Autores

En el caso de la potencia de salida se debe realizar el mismo procedimiento que la validación de la potencia de entrada, de modo que la información que se tome del autor deba garantizar tanto la confiabilidad del cálculo de la potencia de entrada como la de salida de un compresor tipo scroll, de modo que se pueda confirmar la validación del programa bajo el mismo caso.



Figura 24. Diagrama de cálculo de error de la potencia de salida.

Fuente: Autores

Estos casos de validación permitirán no solo conocer la confiabilidad del programa y su funcionalidad, sino establecer las limitaciones computacionales y operativas del programa diseñado, de modo que sea posible establecer bajo qué condiciones, equipos, entornos y configuraciones los resultados obtenidos por el programa son confiables.

Para establecer la confiabilidad del programa se establece un criterio de error, esto permite evaluar que tan lejos o que tan cerca están los resultados obtenidos con respecto al patrón referencial, por ello se aplica la siguiente formulación:

$$\%E = \frac{\text{Valor real} - \text{Valor aproximado}}{\text{Valor real}} * 100\%$$

Es de interés mencionar que el valor real hace referencia a la variable plasmada en el caso de la literatura que será tomada como eje referencial, por su parte el valor aproximado será tomado como el valor obtenido por la programación, ecuaciones y formulaciones presentes en la herramienta computacional.

Es necesario definir que el porcentaje de aceptación debe ser menor al 5% de modo que se pueda establecer con total seguridad que la función u objetivo del programa computacional sea realizado correctamente y por ende exista un criterio de respaldo ante los resultados.

3.2 Resultados y discusión

3.2.1 Revisión bibliográfica

En la revisión bibliográfica establecida se mencionó que existen diversos modelos, ecuaciones, fórmulas matemáticas y normativas que permiten establecer y modelar el funcionamiento de un compresor tipo scroll en función de sus variables operacionales, esto permitirá establecer que ecuaciones, formulaciones y/o modelos serán aplicados para diseñar la herramienta computacional de carácter no invasivo.

A continuación, se plasmará una tabla donde se resumirá la información realizada por esos autores dando así una visión de su trabajo realizado.

Tabla 3. Resumen de la revisión bibliográfica

Autores	Año	Finalidad	Conclusiones
AHRI Standard 540 (Air-Conditioning, 2015)	2015	El Instituto de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración estableció unos modelos matemáticos que permiten caracterizar las condiciones operacionales de los compresores tipo scroll en función de presiones y temperaturas	Las ecuaciones y modelos establecidos caracterizan y estiman el trabajo realizado por el compresor y flujo masico presente en el compresor en función de sus presiones, temperaturas y coeficientes de regresión.
Shuangquan Shao, Wenxing Shi, Xianting Li y Huajun Chen (Shuangquan Shao, 2004)	2004	Validar un modelo desarrollado llamado AHRI reducido que permita estimar potencia y flujo masico de un compresor bajo un modelo polinómico en función de las temperaturas, presiones y coeficientes adimensionales.	El modelo es conservativo y valido para ciertos fabricantes de compresores scroll facilitando la caracterización y análisis operativo. Se sugiere aplicar para las marcas SANYO, HITACHI y MITSUBISHI.

Continuación de la Tabla 3

<p>IEEE Standard 112 (Committee, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2017)</p>	<p>2017</p>	<p>Normativa establecida por El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica que permite caracterizar los motores eléctricos y sistemas de compresión en función de las líneas o fases de alimentación y la intensidad de la corriente eléctrica permitiendo estimar el torque, RPM y potencia suministrada.</p>	<p>El modelo establecido garantiza el cálculo del torque denominado entre torque entre hierro, con ello es factible definir la potencia del sistema mecánico en función de las líneas de alimentación que deben ser cuantificadas por instrumentos de medición.</p>
<p>J. Carmona (Carmona, 2019)</p>	<p>2019</p>	<p>Una comparación energética y técnica entre compresores convencionales con compresores con velocidad variable (Variador de frecuencia) permitiendo establecer desde un punto de vista energético formulaciones y análisis energético</p>	<p>Se describen pautas y una metodología de diagnóstico energético y térmico de compresores desde un punto de vista de ahorro energético y eficiencia, es importante señalar que la implementación de un variador de frecuencia gestiona un ahorro considerable en el consumo energético del compresor.</p>

Continuación de la Tabla 3

J. L. Alfredo Echeverria (Alfredo Echeverria, 2013)	2013	Estudio realizado para calcular presiones intermedias de trabajo de un compresor multietapa por medio de una simulación de optimización denominada Nelder-Mead cuyo objetivo es minimizar el trabajo y consumo del compresor.	Se estableció condiciones de trabajo y se identificó la variable objetivo de estudio. El método de optimización Nelder-Mead se enfocó en la minimización del trabajo del compresor teniendo presente las condiciones térmicas (Presiones, Temperaturas, características y propiedades del refrigerante de trabajo) se concluye que las presiones y temperaturas son las que generan un mayor impacto en el trabajo.
Ródenas Cantó (Ródenas, 2019)	2019	Establecer correlaciones y/o modelos matemáticos para caracterizar el comportamiento mecánico, físico y térmico de los compresores tipo scroll, partiendo de la normativa AHRI Standard 540.	Se establecieron curvas de superficie que identificaron condiciones operacionales ideales para minimizar el trabajo del compresor, a su vez, se desarrolló un modelo más flexible y con alta confiabilidad si es comparado con la norma AHRI Standard 540 sin tener presente las condiciones técnicas y de fabrica del compresor.

Es importante resaltar que la revisión bibliográfica permite establecer el alcance y el grado de profundización desarrollado en otros proyectos que son alineados a este trabajo realizado, enfocado en diseñar una herramienta computacional, a su vez, establecer e identificar los diversos modelos y formulaciones que por medio de la norma AHRI Standard

540, permitan caracterizar y diagnosticar un compresor tipo scroll, de modo que sea posible unirlos, programarlas y ejecutarlas para caracterizar desde un punto de vista operativo, técnico y energético el comportamiento de un compresor.

3.2.2 Diseño de la herramienta computacional

Para el diseño de la herramienta computacional fue necesaria una recopilación de información científica y técnica que permitiera el análisis y diagnóstico de compresores, además se estableció por facilidad y aplicabilidad el programa Matlab como medio de programación con el fin de plasmar y ejecutar los modelos matemáticos y físicos, en la Figura 25 se evidencia el flujograma del programa.

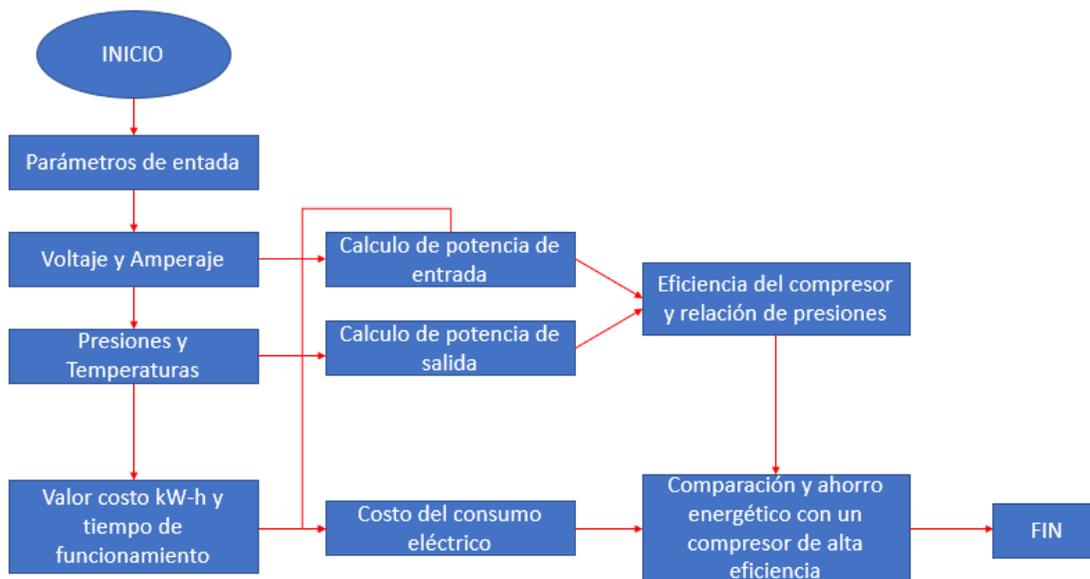


Figura 25. Flujograma de la herramienta computacional.

Fuente: Autores

Como primer paso es necesario recopilar información funcional del equipo, es decir su voltaje, amperaje, temperaturas y presiones utilizando equipos disponibles por el personal, tal como pinzas voltiamperimetricas, voltímetros, termómetros y juego de manómetros de modo que se permita cuantificar y conocer las variables operacionales del sistema, cabe mencionar que dichas informaciones se deben realizar una vez el sistema se encuentre en funcionamiento, después de ello el programa realizara los diversos cálculos enfocados a estimar la potencia de entrada, de salida, consumo eléctrico, eficiencia y relación de presiones de modo que dichas variables permitan caracterizar el sistema, igualmente comparar el compresor con otro de mayor eficiencia para así calcular el ahorro energético obtenido, en los anexos presentes en dicho documento está plasmado los códigos y diseño del programa, de modo que el resultado obtenido es una interfaz que es desarrollada e ilustrada a continuación:



Figura 26. Interfaz del programa desarrollado en Matlab.

Fuente: Autores

Es importante resaltar y aclarar que la información obtenida por el personal se debe agregar en la columna de parámetros de entrada ilustrada en la siguiente imagen, donde se observan una serie de flechas rojas que señalan el sitio donde se debe insertar los datos e información:

The image shows a software interface window titled "Parametros de Entrada". It contains a list of input fields for various parameters. Red arrows point to each of these fields, indicating they are the focus of the figure. The parameters and their values are as follows:

Variable a ingresar	Valor
Valor de la tensión	112
Valor del Amperaje	11.3
Temp de entrada (°C)	12
Temp de Salida (°C)	137
Presión de Entrada (Kpa)	119
Presión de Salida (Kpa)	710
Costo del Kw-h	550
Tiempo de Funcionamiento en horas	5

Figura 27. Parámetros de entrada en el programa.

Fuente: Autores

Una vez agregada dicha información es necesario dirigirse a la columna de operaciones y presionar el botón de calcular, donde el programa tomará las ecuaciones descritas y formulaciones mencionadas, en especial el modelo plasmado en la norma AHRI Standard 540 (Air-Conditioning, 2015) que permiten conocer los aspectos operacionales del sistema, por ello los resultados obtenidos son ilustrados en la columna de resultados como se observa en la Figura 28.



Figura 28. Columna de resultados.

Fuente: Autores

Estos resultados obtenidos por el programa permiten caracterizar el sistema mecánico desde un punto de vista operativo, técnico y energético a la hora de comparar el equipo con uno alta eficiencia (95%) y estimar no solo el consumo del equipo de alta eficiencia si no evidenciar el ahorro energético generado en pesos colombianos.

3.2.3 Manual del usuario

Como una guía a los futuros poseedores del programa se desarrolló una metodología plasmada en una guía de usuario que explica paso a paso el buen uso y adquisición de información para poner en marcha el programa computacional de modo que los resultados obtenidos sean comprendidos y posteriormente analizados para el correcto diagnóstico de la herramienta.

- **Variables de trabajo**

A la hora de analizar y diagnosticar el sistema es necesario conocer las siguientes variables o parámetros que son necesarios para el correcto funcionamiento del sistema:

- Voltaje
- Amperaje
- Temperatura de entrada
- Temperatura de salida
- Presión de entrada
- Presión de salida
- Costo del kw-h
- Tiempo de Funcionamiento

En el caso del voltaje, el técnico o personal presente puede usar un instrumento sencillo como lo es el voltímetro que le permite conocer el voltaje de la línea de alimentación del compresor como se observa en la Figura 29, cabe señalar que el sistema de medición debe estar ajustado y calibrado para obtener una medición exacta y precisa, esto es esencial para obtener resultados de alta confiabilidad, en caso tal de tener dificultad en conocer el voltaje de la línea se puede identificar la información en la placa característica.



Figura 29. Medición de la línea de alimentación

En el caso de la medición de la intensidad eléctrica denominada amperaje se recomienda el uso de una pinza voltiamperimétrica debido a su fácil uso, disponibilidad y rapidez, en la Figura 30 se aprecia como debe ser la correcta medición con este instrumento.



Figura 30. Medición de la línea de alimentación para obtener la intensidad de la corriente eléctrica

Para identificar las presiones de entrada y de salida del compresor es necesario el uso de un kit de manómetros de presiones, estos instrumentos como se observa en la Figura 31 permite identificar la presión de entrada y de salida del compresor identificadas como línea de baja y línea de alta respectivamente.



Figura 31. Medición de presiones de línea de alta y de baja en un compresor.

Una variable que simboliza un reto es la medición de la temperatura de la línea de baja y de alta del compresor, debido a la relación directa con el refrigerante o fluido de trabajo. Algunos kits de manómetros incluyen escalas de temperatura solo para R-22, R402 y R-12, otros por su parte no, eso depende de la marca o kit usado.

Para el uso del programa computacional se recomienda el uso de un medidor de manómetro digital de refrigeración HVAC como se observa en la Figura 32, estos kits modernos permiten no solo medir la temperatura de las líneas del compresor con un error de $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$, si no, también la presión con una alta confiabilidad.



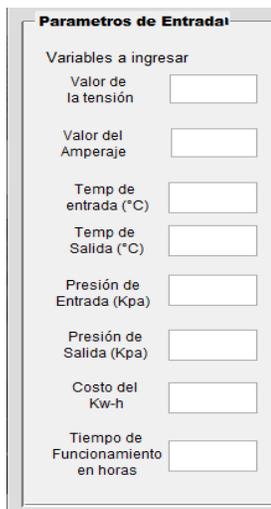
Figura 32. Herramienta digital para la medición de la temperatura y presión.

Con respecto al costo del kW-h esta variable es definida acorde a la región y el distribuidor eléctrico presente, la información se puede consultar en el recibo suministrado mensualmente por la empresa encargada y por su parte el tiempo de funcionamiento es un parámetro definido por el propietario del equipo, dicho tiempo debe ser en horas diarias de uso, generalmente ese tiempo es de 4 a 6 horas.

Es importante resaltar que todas estas variables se deben cuantificar cuando el sistema este en total funcionamiento y no se debe detener ni interrumpir su labor.

- **Método para ingreso de información**

Una vez ya recopilada toda la información del sistema, esta se debe agregar al programa en una columna denominada parámetros de entrada como se observa en la Figura 33, es importante resaltar el respeto de las unidades establecidas que son acorde al sistema internacional de unidades (Voltaje, Amperaje, °C, Kpa, Kw-h y Horas) para obtener resultados confiables.



El formulario, titulado "Parámetros de Entrada", contiene una lista de variables a ingresar con sus respectivos campos de entrada:

Parámetros de Entrada	
Variables a ingresar	
Valor de la tensión	<input type="text"/>
Valor del Amperaje	<input type="text"/>
Temp de entrada (°C)	<input type="text"/>
Temp de Salida (°C)	<input type="text"/>
Presión de Entrada (Kpa)	<input type="text"/>
Presión de Salida (Kpa)	<input type="text"/>
Costo del Kw-h	<input type="text"/>
Tiempo de Funcionamiento en horas	<input type="text"/>

Figura 33. Columna de parámetros de entrada.

Fuente: Autores

Una vez suministrado todos los datos es necesario dirigirse a la columna de operaciones y presionar el botón de calcular como es observado en la figura, de modo que el sistema toma la información y por medio de su código y ecuaciones programadas procede a calcular cierta información que permite analizar y diagnosticar el funcionamiento técnico y energético del compresor.



Figura 34. Botón de calcular.

Fuente: Autores

- **Respuesta del programa**

Una vez presionado el botón de calcular, el sistema procederá a plasmar en la columna de resultados cierta información que permite estimar el funcionamiento, potencia, consumo, costo energético y ahorro con equipo de alta eficiencia. Esta última es quizás una de las variables más importante debido a que existe un comparativo tecnológico con un compresor cuya eficiencia energética es del 95% estimando así cuanto ahorro en pesos colombianos (COP) se podría generar si se instala un compresor moderno.



Figura 35. Columna de resultados

Fuente: Autores

Estos resultados evidencian cuanta potencia demanda el compresor, cuanta potencia suministra al refrigerante, la eficiencia debido al transporte y transformación de la energía, cuanta es la relación de presiones y los respectivos costos asociados al consumo y al ahorro energético generado.

Para la estimación de la potencia de salida que es la energía o trabajo que recibe el refrigerante se tomó la aplicación de la AHRI Standard 540.

3.2.4 Confiabilidad del programa

Por medio de la revisión bibliográfica realizada se pudo establecer una información práctica de un compresor Mitsubishi LH53VBAC (Carmona, 2019), donde se evidencia sus condiciones técnicas y operacionales, de modo que dicha información permitirá cuantificar la validez y confiabilidad del proceso de cálculo realizado por el programa computacional cuyos datos son plasmados en la siguiente tabla:

Tabla 4. Variables operacionales del Mitsubishi LH53VBAC (Carmona, 2019)

Descripción	Valor	Unidad
Refrigerante	R22	-
Voltaje	223	Voltios
Amperaje	7,5	A
Temperatura Entrada	9	°C
Temperatura Salida	129	°C
Presión Entrada	422,31	Kpa
Presión Salida	1586	kPa

Fuente: Autores

Según la metodología propuesta y presentada por Carmona Javier y Jaime Brito (Carmona, 2019) en el proceso de caracterización del compresor Mitsubishi LH53VBAC se obtuvieron los siguientes resultados operacionales y técnicos, cabe mencionar que dicha información fue resumida en la Tabla 5 para validar el programa:

Tabla 5. Variables operacionales del Mitsubishi LH53VBAC (Carmona, 2019)

Descripción	Valor	Unidad
Potencia entrada	2,9156	kW
Potencia Salida	2,112	kW
Relación de Compresión	0,73	-
Giro	1755	RPM

Fuente: Autores

Ahora en el proceso de validación se ingresan los datos suministrados por Carmona Javier y Jaime Brito (Carmona, 2019) en el programa computacional diseñado de modo que los resultados obtenidos son evidenciados en la siguiente imagen, se definió que el proceso de validación y confiabilidad se enfocará en torno a la potencia de entrada y de salida del compresor, dado que estas variables son las principales desde un punto de vista energético.



Figura 36. Datos obtenidos y suministrados por la herramienta computacional para su validación.

Fuente: Autores

En resumen, los datos obtenidos por el programa son ilustrados en la siguiente tabla:

Tabla 6. Resumen de resultados.

Resultados	Valor	Unidad
Eficiencia del Compresor	0,723612	-
Relación de Compresión	3,75554	-
Potencia entrada	2,89685	kW
Potencia Salida	2,0962	kW
Costo consumo	15932,7	COP
Consumo alta eficiencia	12135,9	COP
Ahorro generado	3796,82	COP

Fuente: Autores

Ahora se procede a calcular el porcentaje de error como criterio de confiabilidad de la herramienta, tomando como datos experimentales los obtenidos por el programa, mientras que los teóricos los proporcionados por Carmona Javier y Jaime Brito.

$$\%Error_{potencia\ entrada} = \frac{2,9156 - 2,89685}{2,9156} * 100\% = 0.64\%$$

$$\%Error_{potencia\ salida} = \frac{2,112 - 2,0962}{2,112} * 100\% = 0.74\%$$

En resumen, se observa en la siguiente tabla un análisis de los porcentajes de errores obtenidos para las variables mencionadas:

Tabla 7. Resumen de los valores de potencia y porcentaje de errores obtenidos.

	Valor	Unidades	% Error
Potencia de entrada obtenida	2,89685	Kw	0,64
Potencia de entrada proporcionados por Carmona Javier y Jaime Brito	2,9156		
Potencia de salida obtenida	2,0962	Kw	0,74
Potencia de salida proporcionados por Carmona Javier y Jaime Brito	2,112		

Fuente: Autores

Es conveniente recordar que el porcentaje de error es un indicativo que ilustra que tan confiable es un resultado obtenido bajo un parámetro real de referencia, en este caso se puede observar que los resultados obtenidos bajo la herramienta son de alta confiabilidad ya que como ilustra la tabla anterior los márgenes de errores son muy inferiores al 5%, dando una total seguridad que los resultados obtenidos por la herramienta son confiables

y por ende son los indicados para el proceso de análisis y diagnóstico energético de compresores tipo scroll.

4 Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Una vez evidenciado los resultados planteados para los objetivos propuestos en este proyecto, es seguro afirmar que la herramienta computacional permite analizar y diagnosticar compresores tipo Scroll de una manera eficaz y con una alta confiabilidad, de modo que es capaz de satisfacer una solución al problema propuesto en este documento, donde básicamente se desarrolló un programa de carácter no invasivo para el análisis y diagnóstico energético de compresores tipo Scroll.

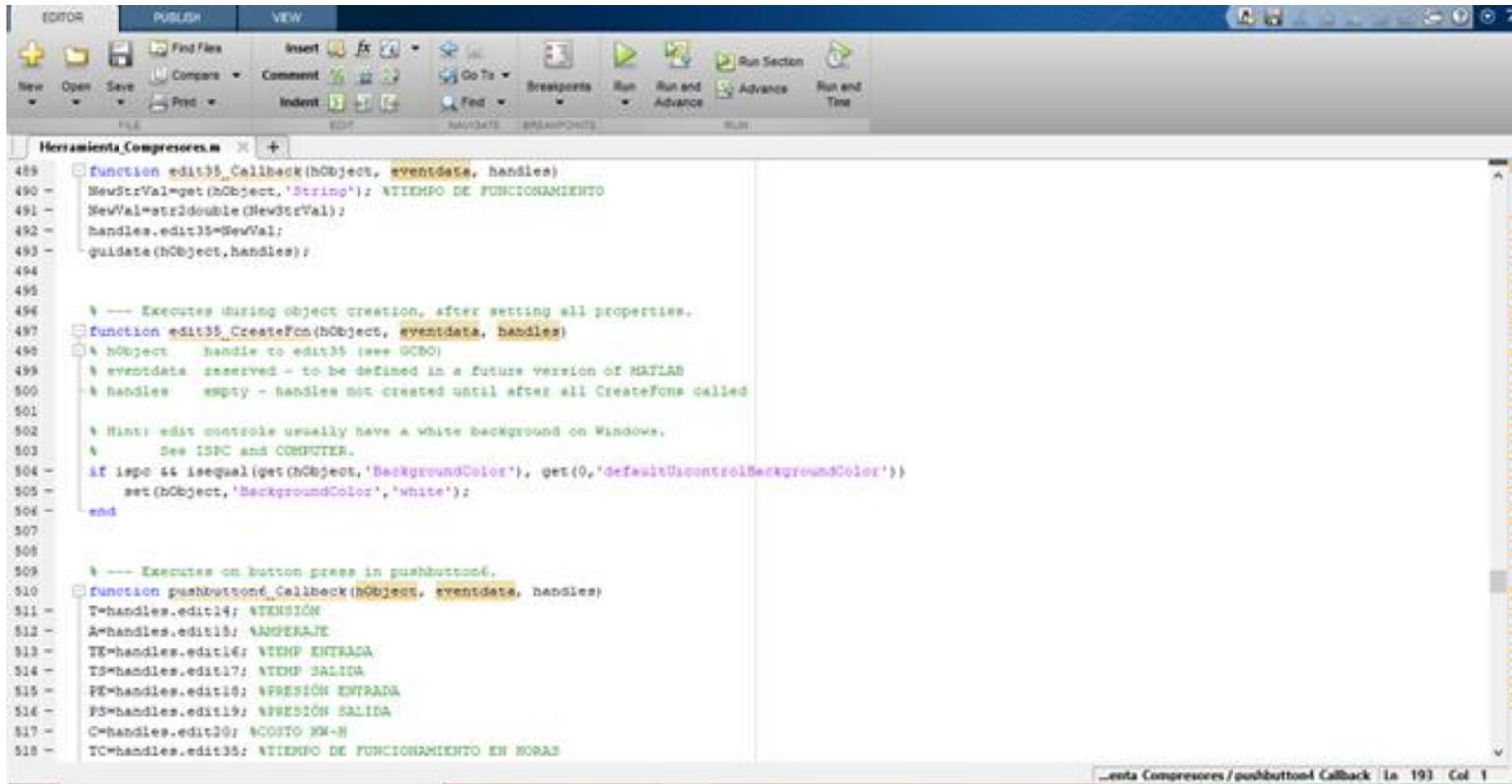
Es claro mencionar que debido a la revisión bibliográfica fue posible establecer y definir una serie de formulaciones, ecuaciones y/o métodos que permiten caracterizar el sistema desde un punto de vista energético, de modo que es factible diagnosticar el sistema obteniendo un alto grado de confiabilidad en sus resultados gracias a la validación realizada, cuyos resultados presentan márgenes de errores inferiores al 5% dando así una total seguridad y validez a la información calculada y mostrada por el programa y gracias a esto es posible afirmar que la herramienta será de gran aplicabilidad en el campo industrial debido a las diversas características presentes en ella, tales como el procesamiento, cálculo y respuesta inmediata de información, lo cual reduce el tiempo de diagnóstico y con ello la gran capacidad de evaluar las condiciones del sistema sin detener ni interrumpir el proceso todo esto con el fin de establecer un diagnóstico enfocado en la gestión energética.

El desarrollo e innovación propuesto en este proyecto impacta en el crecimiento y fortalecimiento de nuevos métodos de análisis y diagnóstico de otros sistemas muy aplicados y conocidos a nivel industrial entre ellos los motores de combustión, turbinas, bombas inclusive ciclos energéticos como Brayton o Rankine, en donde la meta principal será el diagnóstico y evaluación de condiciones operacionales para así establecer diversas soluciones enfocadas en un ahorro energético y minimizar el impacto ambiental.

4.2 Recomendaciones

- El programa es propuesto para análisis y diagnóstico de compresores tipo Scroll, por ende, no debe ser usado en otros tipos de compresores debido a su funcionalidad y características propias.
- Fortalecer el desarrollo y/o trabajo de otras herramientas enfocadas en análisis y diagnóstico energético de otros elementos mecánicos tales como motores, bombas centrífugas, ciclos de generación de corriente eléctrica, turbinas, entre otros sistemas.
- Desarrollar versiones futuras en las que se puedan agregar funciones, comandos, análisis y procesos que permitan no solo el análisis y diagnóstico energético si no también el mecánico, operativo, técnico, etc.

A. Anexo: Código de la herramienta computacional



```
EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Insert Comment Go To Breakpoints Run Run and Advance Run Section Run end Time
FILE EDIT NAVIGATE BREAKPOINTS RUN

Herramienta_Compresores.m x +
488 function edit35_Callback(hObject, eventdata, handles)
490 NewStrVal=get(hObject,'String'); ATIEMPO DE FUNCIONAMIENTO
491 NewVal=str2double(NewStrVal);
492 handles.edit35=NewVal;
493 guidata(hObject,handles);
494
495
496 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
497 function edit35_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
498 % hObject handle to edit35 (see GCBO)
499 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
500 % handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
501
502 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
503 % See ISPC and COMPUTER.
504 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
505 set(hObject,'BackgroundColor','white');
506 end
507
508
509 % --- Executes on button press in pushbutton6.
510 function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
511 T=handles.edit14; ATENSIÓN
512 A=handles.edit18; ANGERAJE
513 TE=handles.edit16; TIEMPO ENTRADA
514 TS=handles.edit17; TIEMPO SALIDA
515 PE=handles.edit18; PRESIÓN ENTRADA
516 PS=handles.edit19; PRESIÓN SALIDA
517 C=handles.edit20; COSTO KW-H
518 TC=handles.edit35; ATIEMPO DE FUNCIONAMIENTO EN HORAS
```

A. Anexo: Código de la herramienta computacional

The image displays a MATLAB IDE window with a code editor on the left and a graphical user interface (GUI) window titled "Herramienta Computacional Para Compresores Scroll V1.0" on the right. The code editor shows MATLAB code for creating and handling GUI controls. The GUI window is divided into three main sections: "Parametros de Entrada", "Resultados", and "OPERACIONES".

Parametros de Entrada: This section contains input fields for the following variables:

- Valor de la tensión
- Valor del Amperaje
- Temp de entrada (°C)
- Temp de Salida (°C)
- Presión de Entrada (Kpa)
- Presión de Salida (Kpa)
- Costo del Kw-h
- Tiempo de Funcionamiento en horas

Resultados: This section displays output fields for the following results:

- Eficiencia del Compresor
- Relación de Compresión
- Potencia de Entrada (KW)
- Potencia de Salida (KW)
- Costo del consumo eléctrico (COP)
- Consumo equipo de alta eficiencia
- Ahorro generado

OPERACIONES: This section contains two buttons: "CALCULAR" and "SALIR". Below the buttons is a small image of four blue scroll compressors.

The code in the editor includes functions for creating and handling these GUI controls, such as `edit20_CreateFcn` and `edit35_Callback`.

5 Bibliografía

- Air-Conditioning, H. &. (2015). AHRI Standard 540. USA: ahrinet .
- Alfredo Echeverria, J. L. (2013). *Calculo de las presiones intermedias usando el metodo Nelder-Mead para minimizar el trabajo total de un sistema de compresión adiabatica multietapas*. Trujillo: Uni-NaciolanTrujillo.
- Aller, J. (2008). *Maquinas electricas rotativas- Introducción a la teoria general*. Caracas : Ediciones Universidad Simon Bolivar.
- Arencibia, K., & Tricio, V. (2014). Evaluación Experimental de Compresores Herméticos en Condiciones de Clima Tropical. Eficiencia y Capacidad Frigorífica. *Información tecnológica*, 103-110.
- Aute, V., & Martin, C. (2016). A Comprehensive Evaluation of Regression Uncertainty and the Effect of Sample Size on the AHRI-540 Method of Compressor Performance Representation. *International Compressor Engineering Conference*, 1-10.
- Belman-Flores, J., Barroso, J., Rodriguez-Muñoz, A., & Camacho-Vazquez. (2015). Enhancements in domestic refrigeration, approaching a sustainable refrigerator a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 955-968.
- Bitzer. (01 de Julio de 2017). *Semi-hermetic reciprocating compressors (KP-104-5)*, "Semi-Hermetic Screw Compressors". Obtenido de <https://www.bitzeravp.com/en/documentation/?lng=en&lang=en>
- Cantó, R., & Navarro Peris, E. (2017). *DESARROLLO DE CORRELACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE COMPRESORES SCROLL DENTRO DEL CAMPO DE LA REFRIGERACIÓN COMERCIAL*. Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Carmona, J. (2019). Comparación de la eficiencia de compresores convencionales con compresores accionados con velocidad variable. Cuenca Ecuador: Universidad Catolica Salesiana .
- Cavazzini, G., Giacomel, F., Ardizzon, G., Casari, N., Fadiga, E., Pinelli, M., & Suman, F. (2020). CFD-based optimization of scroll compressor design and uncertainty quantification of the performance under geometrical variations. *Energy*, 1-18.
- Cengel, Y. (2012). *Termodinamica* . Ciudad de Mexico: Mc Graw Hill.

- Committee, E. M. (2004). *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: American National Standard Institute.
- Committee, E. M. (2017). *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: American National Standard Institute.
- Coral, J. D. (2011). *Diseño de una herramienta computacional para el análisis del desempeño energético de reactores rotatorios para la producción de cemento*. Manizales : Publicaciones Universidad Nacional.
- Corporación, S. (2019). *¿Qué es un motor trifásico? Características, tipologías y aplicaciones*. Madrid-España: S&P.
- de la Fuente, m. (2010). La relación de trabajo de retroceso de un ciclo Brayton. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 259-266.
- Dincer, I. (2017). *Refrigeration systems and applications* . New York: John Wiley & Sons.
- Harper, G. (2002). *Curso de transformadores y motores de inducción*. Mexico DC: Limusa.
- Jara, N., Reinoso, F., Isaza, C., Jara, L., Aguinaga, A., & Moreno, T. (2017). Instrumentación de un Refrigerador Doméstico para El Análisis del Comportamiento de las Variables de Presión y Temperatura de Operación. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 1-17.
- Karen Figueredo, A. O. (2018). *Análisis mediante dinámica de fluidos computacional de la etapa de expansión y compresión en un turbo compresor radial*. Pereira : Publicaciones UPereira.
- Lopez, G. (2014). *Desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento de gasoductos y redes de distribución de gas*. Bogota: Publicaciones UN.
- Luis Fernando Mantilla Peñalba, J. A. (2013). *Gestión Energética de los motores eléctricos: mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad* . Santander (España): E.T.S.I.I. y T., Universidad de Cantabria .
- Narvaez, R. J. (2012). *Herramienta computacional para el diagnóstico de fallas en tiempo real y el apoyo en la toma de decisiones, a través de sistemas basados en conocimiento*. Bogota : Publicaciones Uniandes.
- Nieto, A. (2018). *El Compresor Scroll Sinónimo de Eficiencia y de Ahorro Energético en Sistemas HVAC&R*. Ciudad de Mexico: Mundo HVACR.
- Pediapress. (2011). *Sistemas de refrigeración por compresión*. *Pediapress*, 1-53.
- Pérez, A. N. (2015). *Leyes y conceptos técnicos básicos para lograr instalaciones eléctricas seguras*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Editores S.R.L.
- R. Figura, E. S. (2014). *In-Service Efficiency Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor*. Radom-Poland: Technical University of Radom, Faculty of Transport and Electrical Engineering.

- RENEDO, C. J. (2017). *El Compresor Scroll*. Santander, España: Universidad Católica de Santander.
- Requez, J. P. (18 de Septiembre de 2017). *ACAPMI Blog*. (La Plataforma de Cursos y Asesorías Mediante Internet) Recuperado el 5 de Octubre de 2020, de <http://acapmi.com/blog/2017/09/18/que-es-matlab/>
- Robison, D., & Beaty, P. (2000). Compressor types, classifications, and applications. *PROCEEDINGS OF THE TWENTY-FIRST TURBOMACHINERY SYMPOSIUM*, 183-188.
- Robledo, G. (2017). *Rendimiento y aplicaciones de los compresores*. Buenos Aires : ACR Todo .
- Ródenas, L. (2019). *DESARROLLO DE CORRELACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE COMPRESORES SCROLL DENTRO DEL CAMPO DE LA REFRIGERACIÓN COMERCIAL*. Valencia-España: Universidad Valencia.
- RUIZ, T. J. (2016). *Análisis Comparativo de Compresores Frigoríficos Para R-134a*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Ruz, M., Fragoso, S., & Vasquez, F. (2016). Planta experimental para la supervisión y control del ciclo de refrigeración por compresión de vapor. *Jornadas Automaticas*, 1-8.
- San Juan, D. (2015). Compresores Scroll una alternativa sostenible, económica y duradera. *Cero grados celsius*, 1-15.
- Shao, S., Shi, W., Li, X., & Chen, H. (2004). Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data. *International Journal of Refrigeration*, 805-815.
- Shuangquan Shao, W. S. (2004). *Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data*. China- Beijing: Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing.
- Wang, S. (2001). *Handbook of air conditioning and refrigeration*. New York: McGraw-Hill.