



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias

REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN REFRIGERADORES
DOMÉSTICOS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Marco Antonio Gómez Guzmán

Dirigido por:

Dr. Roberto Valentín Carrillo Serrano

Co-dirigido por:

Dr. Gerardo Israel Pérez Soto

SINODALES

Dr. Roberto Valentín Carrillo Serrano
Presidente

Dr. Gerardo Israel Pérez Soto
Secretario

Dr. Juvenal Rodríguez Resendíz
Vocal

Dr. Mario Trejo Perea
Suplente

Dr. José Gabriel Ríos Moreno
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Junio de 2020
México

RESUMEN

En la actualidad uno de los principales problemas energéticos es el consumo excesivo de electricidad en los hogares y microempresas. El refrigerador doméstico es uno de los aparatos electrodomésticos que más energía consume. Un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) acoplado a un compresor automotriz, es propuesto e implementado para sustituir al compresor tradicional del ciclo de compresión de vapor (VCC), propulsado normalmente por motores de inducción, además de ser alimentado por 24 volts(V) de corriente directa (CD) esto con la finalidad de reducir el consumo energético del refrigerador.

Este trabajo trata una forma de mover el compresor del ciclo de compresión de vapor con un motor PMSM que tiene eficiencias probadas en el orden del 95 % a diferencia del motor de inducción que tiene eficiencias del 85 %. Se presenta una revisión previa sobre trabajos realizados con diferentes ciclos de refrigeración y se obtiene que el ciclo VCC es el que mayor coeficiente de rendimiento (COP) tiene, es decir, el que logra una mejor temperatura deseada con respecto al trabajo requerido que realiza. El motor utilizado es trifásico, por lo que se utiliza una topología de tres puentes H para alimentar cada una de sus fases con un bus de 24VCD. Se programa una interfaz vía puerto serie, la cual se comunica con una matriz de puertas lógicas programable en campo (FPGA), enviándole tres señales senoidales, ésta a su vez las recibe y envía tres señales de salida las cuales son del tipo modulación de ancho de pulso (PWM), desfasadas 120°, las cuales son recibidas por los puentes H. Estos alimentan cada una las fases y se logra el movimiento del motor. Se aísla la etapa digital de los puentes H por medio de optoacopladores con canales de alta velocidad. Se acopla el nuevo sistema al refrigerador y se realizan pruebas de medición de energía para verificar el consumo en kilowatts hora (kWh) que maneja el refrigerador alimentado con corriente alterna (CA). Se obtiene como resultado el movimiento del PMSM con la topología utilizada y el voltaje de alimentación de 24V.

(Palabras clave: Refrigerador, compresión de vapor, coeficiente de rendimiento, PMSM, FPGA, compresor, puente H)

ABSTRACT

Currently one of the main energy problems is the excessive consumption of electricity in households and micro businesses. The household refrigerator is one of the most energy-intensive household appliances. A permanent magnet synchronous motor (PMSM) coupled to an automotive compressor is proposed and implemented to replace the traditional vapour compression cycle (VCC) compressor, normally driven by induction motors, as well as being powered by 24 volts(V) direct current (DC) in order to reduce the energy consumption of the refrigerator.

This work deals with a way to move the compressor of the vapor compression cycle with a PMSM motor that has proven efficiencies in the order of 95 % as opposed to the induction motor that has efficiencies of 85 %. A previous review on work carried out with different refrigeration cycles is presented and it is obtained that the VCC cycle is the one with the highest coefficient of performance (COP), meaning the one that achieves a better desired temperature with respect to the required work it performs. The motor used is three-phase, so a three-H-bridge topology is used to feed each of its phases with a 24-volt direct current (VDC) bus. A serial port interface is programmed, which communicates with a field programmable logic gate array (FPGA), sending three sinusoidal signals, which in turn receive and send three output signals which are of the pulse width modulation (PWM) type, offset 120°, which are received by the H-bridges. These feed each of the phases and the motor movement is achieved. The digital stage is isolated from the H-bridges by means of optocouplers with high-speed channels. The new system is coupled to the cooler and energy measurement tests are performed to verify the consumption in kilowatts per hour (kWh) that the altern current (AC) powered cooler handles. The result is the movement of the PMSM with the topology used and the 24V supply voltage.

(Key words: Refrigerator, vapor compression, coefficient of performance, PMSM, FPGA, compressor, H bridge)

Dirección General de Bibliotecas UAQ

A Dios, a mis padres y a mi hermano
—por todo el apoyo brindado.

AGRADECIMIENTOS

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme becado durante mis estudios de maestría.
- A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por recibirme para realizar mis estudios de posgrado y por ser mi segunda casa de estudios.
- A los profesores del departamento de Posgrado de la Facultad de Ingeniería por todas sus enseñanzas, en especial al Dr. Roberto Valentín Carillo Serrano por haber dirigido este trabajo de tesis, por su constante retroalimentación, por estar siempre al pendiente de mi aprendizaje, por su apoyo, por sus sabios consejos, su confianza, paciencia y amistad.
- Al Dr. Gerardo Israel Pérez Soto por su constante retroalimentación y sus atinados comentarios, los cuales me ayudaron de mucho para mejorar mi trabajo.
- Al los investigadores Dr. Juvenal Rodríguez Resendíz, Dr. Mario Trejo Perea y Dr. José Gabriel Rios Moreno quienes complementaron este trabajo con sus constructivos comentarios y correcciones.
- Al Dr. Juan Manuel Ramos Arreguin por sus valiosos consejos y sugerencias y por estar al pendiente de mis avances de tesis en las diferentes materias impartidas por él.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	9
2.1. Planteamiento del problema	31
2.2. Justificación	32
3. HIPÓTESIS	36
4. OBJETIVOS	37
4.1. Objetivo general	37
4.2. Objetivos específicos	37
5. METODOLOGÍA	38
5.1. Diagrama de flujo.	38
5.2. Acondicionamiento eléctrico del motor.	40
5.3. Etapa de potencia.	42
5.4. Etapa digital.	45
5.4.1. Microcontrolador PIC18F4431	45
5.4.2. FPGA modelo Upduino 2.0	47
5.5. Interfaz en software LABVIEW y DEV C++.	49
5.6. Optoacoplamiento.	50
5.7. Medición de energía consumida.	52
5.8. Acoplamiento mecánico del compresor y el PMSM al refrigerador.	57
5.9. Compresor tipo York y motor PMSM de 1.8kW.	62
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
6.1. Primeras mediciones en corriente alterna.	65
6.2. Acoplamiento del motor al compresor automotriz.	70
6.3. Interfaz en Labview y DEV C++.	71
6.4. Circuito con Microcontrolador PIC18f4431.	73

6.5. Circuito con optoacopladores y FPGA.	75
6.6. Conexión de los puentes H IBT-2 a las tres fases del PMSM y accionamiento.	77
6.7. Acoplamiento del nuevo sistema al refrigerador.	78
7. CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	82
APÉNDICES	92
A. Programas utilizados en la experimentación	92
A.1. Código de recepción y envío de señales PWM	92
A.2. Código en Dev C++ para envío de señales senoidales	93
A.3. Código en Dev C++ para el envío de un solo ciclo de señal senoidal	96
A.4. Diagrama de bloques en Labview	99
A.5. Programa en Software Matlab para graficar los datos generados en archivo de texto, por los programas en Dev C++	100
A.6. Programa de envío de datos al PIC18f4431.	101
A.7. Código de recepción de datos por el PIC18f4431.	105
B. Productos generados.	110
B.1. Portada de la revista Aristas.	110
B.2. Artículo CONIIN UAQ 2019.	111

ÍNDICE DE CUADROS

5.1. Lista de materiales.	58
6.1. Resultados de la primera prueba con el FR-142 alimentado con CA.	66
6.2. Resultados de la segunda prueba con el FR-142 alimentado con CA.	68
6.3. Resultados de la segunda prueba pero midiendo la energía con el wathorímetro COIL CT 061.	69

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Clasificación de refrigeradores (NOM-015-ENER-2018, 2018).	2
1.2.	Ciclo ideal de compresión de vapor (VCC) (Cengel y Boles, 2011).	3
1.3.	Refrigerador termoeléctrico con módulo Peltier (Choi et al., 2018).	4
1.4.	Principales componentes de un sistema de refrigeración por adsorción (Fernandes et al., 2014).	5
1.5.	Sistema de refrigeración solar por absorción de doble efecto (Sarbu y Sebarchievici, 2015).	6
2.1.	Esquema del ciclo de compresión de vapor (VCC) (Megdouli et al., 2017). . .	10
2.2.	Diagrama del ciclo de doble evaporador (Yoon et al., 2011).	16
2.3.	Kilowatts hora por metro cuadrado al día dependiendo el color en el mapa (Solargis, 2019).	33
2.4.	Índice de marginación en México (CONAGUA, 2018).	34
5.1.	Diagrama de flujo de la metodología a seguir en la experimentación.	39
5.2.	Motor PMSM marca ESTUN con los seis cables de alimentación visibles. . .	41
5.3.	Esquema que muestra la conexión que se requiere hacer en los puentes H para accionar el motor.	42
5.4.	Puertos de entrada y salida del puente H modelo IBT-2.	43
5.5.	Diagrama de conexión del circuito lógico para un solo puente H.	45
5.6.	FPGA modelo Upduino 2.0.	47
5.7.	Interfaz de comunicación serial entre la PC y la FPGA utilizando software LABVIEW.	49
5.8.	Diagrama que muestra la conexión de dos señales PWM con los optoacopladores 4N25.	50
5.9.	Diagrama que muestra la FPGA optoacoplada con los puentes H IBT2.	51
5.10.	Refrigerador marca DAEWOO modelo FR-142 utilizado como prototipo experimental.	52
5.11.	Termómetro bimetálico marca ibili, modelo 743401.	54
5.12.	Termómetro láser infrarrojo marca FLUKE modelo 62 Max.	54
5.13.	Analizador de energía FLUKE 435 utilizado en la experimentación midiendo los kWh consumidos en CA.	55
5.14.	Wattorímetros utilizados como una alternativa económica para la medición de energía.	56
5.15.	Compresor automotriz marca DENSO.	57
5.16.	Bomba de vacío a utilizar para el cambio de refrigerante.	59
5.17.	Manómetros marca STARK utilizados para la medición de presión del sistema.	59

5.18. Conexiones entre los manómetros, la bomba de vacío y el compresor.	61
5.19. Compresor de aire acondicionado automotriz modelo York.	62
5.20. Motor PMSM de 1.8kW.	63
6.1. Acoplamiento del PMSM a un compresor de aire acondicionado automotriz. .	70
6.2. Resultados de la interfaz en funcionamiento.	71
6.3. Resultados de la interfaz DEV C++ en funcionamiento.	72
6.4. Diseño de PCB en 3D para el circuito con el PIC18f4431.	73
6.5. Tarjeta electrónica en físico, circuito lógico agregado y puente H IBT2	74
6.6. Circuito con optoacopladores 4N25.	75
6.7. Circuito impreso PCB.	75
6.8. Señales PWM conectadas a cada puente H y estos a su vez a cada fase del motor.	77
6.9. Diagrama de conexiones de ambos compresores en el refrigerador.	78
6.10. Conexión de la tubería del refrigerador con el nuevo compresor automotriz. .	79
B.1. Portada de la Revista Aristas Volumen 7, año 2019.	110
B.2. Portada del artículo publicado en el CONIIN UAQ 2019.	111

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Dirección General de Bibliotecas UAQ

I. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía eléctrica incrementa año con año, como consecuencia del aumento de la población mundial. Los refrigeradores domésticos consumen el 6 % de la energía producida alrededor del mundo (Choi et al., 2018). Un refrigerador es un aparato para uso doméstico enfriado por medio de un sistema refrigerante alimentado con energía eléctrica y en el cual se almacenan alimentos para su conservación (NOM-015-ENER-2018, 2018). Un refrigerador consta de varios módulos diferentes: gabinete, puertas, accesorios internos (estantes y cajones), sensores y controles, piezas generadoras (motor o compresor), intercambiador de calor (condensador y evaporador), dispositivo de suministro de agua y otras partes. Un refrigerador doméstico puede tener hasta 3000 componentes (Woo et al., 2020)

La vida útil del refrigerador doméstico es un parámetro que puede variar según diversos factores que involucran el modelo de éste, el tipo de compresor que utiliza, el uso que se le da al aparato, entre otros. Un promedio de la duración de vida útil es de al menos 10 años (Piai et al., 2020; Woo et al., 2020). En estos electrodomésticos es mayormente utilizado el ciclo de compresión de vapor para su funcionamiento (Cengel y Boles, 2011). Así mismo los refrigeradores se clasifican según la NORMA Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2018, Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado. Esta clasificación es de acuerdo al tipo de refrigerador y al sistema de deshielo con el que éste aparato cuenta. La clasificación se puede observar en la Figura 1.1.

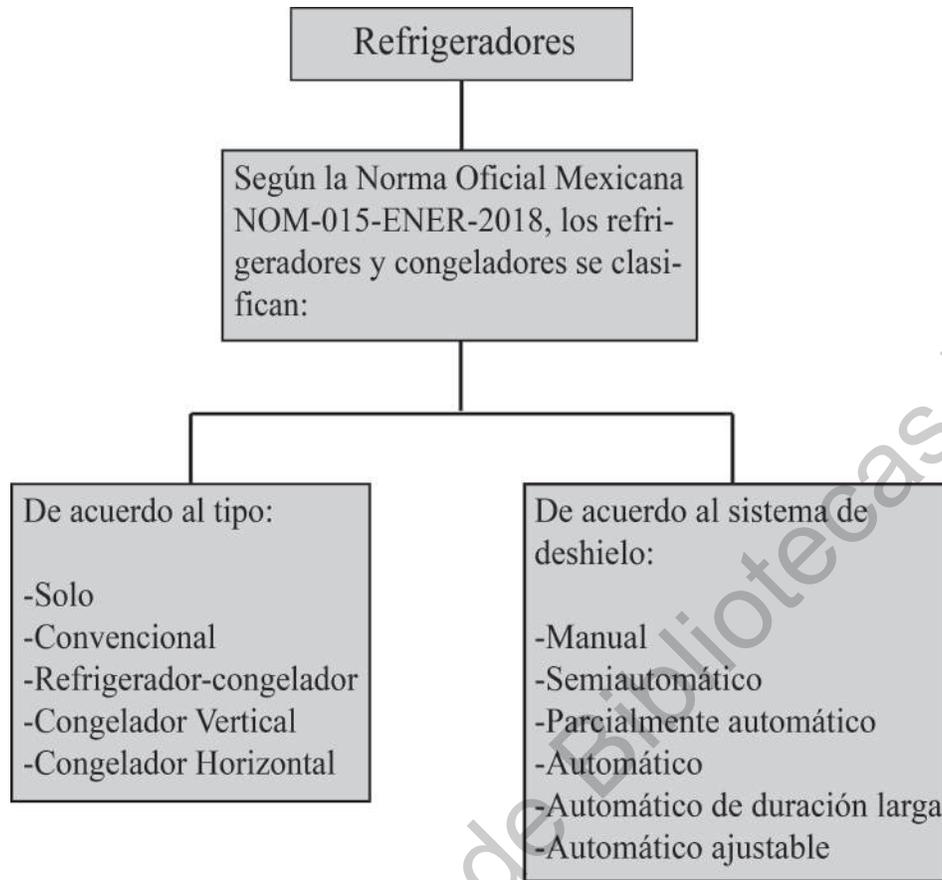


Figura 1.1: Clasificación de refrigeradores (NOM-015-ENER-2018, 2018).

En la actualidad existen diferentes ciclos de refrigeración. Un ciclo es una combinación de dos o más procesos que, cuando se completan, regresan el sistema a su estado inicial; un sistema que funciona en un ciclo se llama dispositivo cíclico (Rolle, 2006). Entre los ciclos de refrigeración utilizados en la actualidad se encuentran: el ciclo de compresión de vapor, nombrado VCC por las siglas de *Vapor Compression Cycle* en inglés, el ciclo termoeléctrico (Ullah et al., 2013) y otros ciclos menos utilizados como termoacústico, termoelástico, ciclo magnético, ciclo de absorción y de adsorción, estudiados previamente en, Kitanovski y Egolf (2009), Wang et al. (2010), Yu et al. (2010) y Choi et al. (2018), por mencionar algunos. En el caso del ciclo VCC, consta de cuatro etapas. El compresor se encarga de succionar el refrigerante en forma gaseosa y comprimirlo en alta temperatura. El evaporador es la parte del ciclo donde se producen las bajas temperaturas, el refrigerante se evapora y absorbe el calor. En el condensador se libera el calor absorbido por el refrigerante en el evaporador y se libera al medio ambiente. En el caso de la válvula de expansión, ésta se encarga de regular el caudal de refrigerante que entra al evaporador y proporcionar una diferencia entre el lado de baja presión y alta presión. Pasando esta etapa y llegando al evaporador vuelve a comenzar el ciclo, entrando el refrigerante gaseoso al compresor. En la Figura 1.2 se muestra una imagen del ciclo ideal de compresión de vapor con sus cuatro etapas y componentes principales.

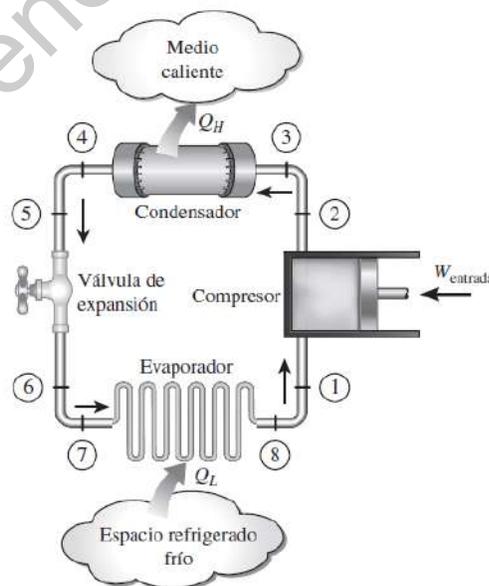


Figura 1.2: Ciclo ideal de compresión de vapor (VCC) (Cengel y Boles, 2011).

La refrigeración termoeléctrica, como se puede ver en la Figura 1.3, implica el uso del efecto Peltier para transformar la electricidad en calor para enfriar y/o calentar. La refrigeración termoeléctrica es operada por una corriente continua que pasa a través de un circuito formado por dos conductores o semiconductores diferentes que producen una diferencia de temperatura en la unión de dos conductores, esto se conoce como efecto Peltier y el refrigerador termoeléctrico utiliza el módulo Peltier intercalado por dos intercambiadores de calor. El módulo Peltier consiste en una serie de semiconductores tipo N y tipo P conectados en serie por bandas de cobre y cubiertos con placas de cerámica. El calor se bombea de un lado del módulo al otro a través de los intercambiadores de calor. Esta tecnología está disponible comercialmente en refrigeradores de pequeña escala. El coeficiente de rendimiento (COP) de la refrigeración termoeléctrica es muy bajo, con un valor de 0,58 por ejemplo, en el estudio de Rincón-Casado et al. (2018).

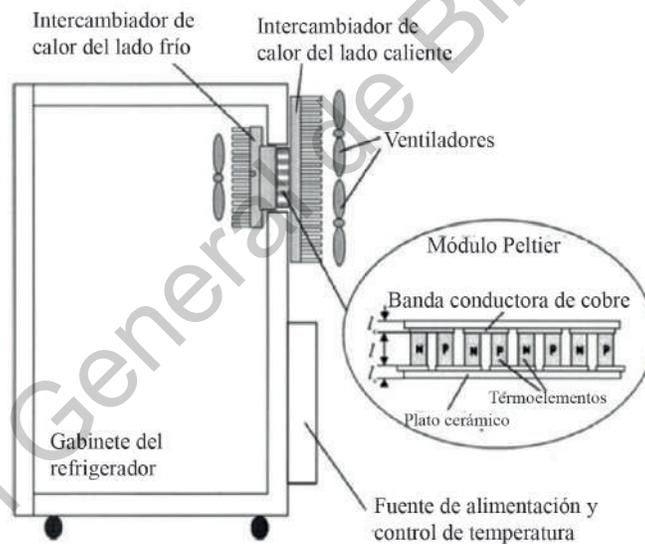


Figura 1.3: Refrigerador termoeléctrico con módulo Peltier (Choi et al., 2018).

En la refrigeración por adsorción las moléculas de una sustancia se fijan comúnmente en una superficie o material poroso, La adsorción se produce en la superficie, donde las fuerzas de cohesión, incluidas las fuerzas electrostáticas y los enlaces de hidrógeno, actúan entre las moléculas de todas las categorías, independientemente de su estado de agregación y este proceso es reversible. Las fuerzas de superficie desequilibradas en el límite de fase causan cambios en la concentración de moléculas en la interfaz del sólido o fluido. El proceso de adsorción implica la separación de una sustancia y su concentración en la superficie de otra. La fase de adsorción en el adsorbente y el material concentrado o adsorbido en la superficie de esa fase en el adsorbato. La adsorción es un proceso exotérmico asociado con la evolución del calor; la cantidad de liberación de calorías depende de la magnitud de las fuerzas electrostáticas involucradas, el calor latente y las energías de los enlaces electrostáticos y químicos. Como en la fase adsorbida, las moléculas de adsorbato están en una entropía más ordenada, esta decrece. En la Figura 1.4 podemos ver un sistema de refrigeración por adsorción y algunos de sus principales componentes.

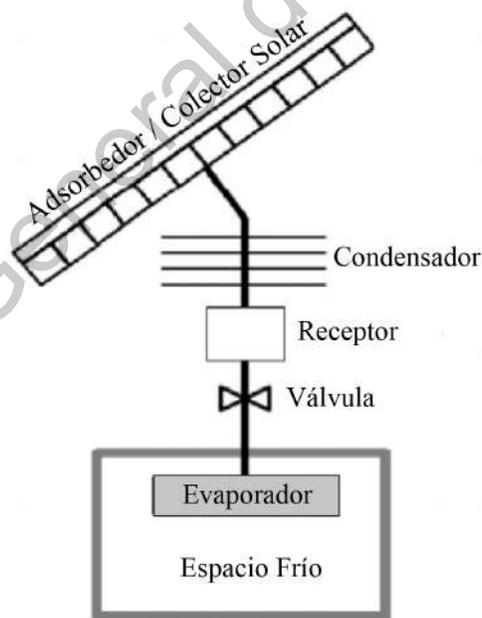


Figura 1.4: Principales componentes de un sistema de refrigeración por adsorción (Fernandes et al., 2014).

La tecnología de refrigeración por absorción consiste en un generador, una bomba y un absorbedor que son colectivamente capaces de comprimir el vapor de un refrigerante. El evaporador extrae el refrigerante de vapor por absorción en el absorbedor. La energía térmica extra separa el vapor de refrigerante de la solución. El refrigerante se condensa al rechazar el calor en un condensador. Luego el refrigerante líquido enfriado se expande por el evaporador y el ciclo se completa. El lado del refrigerante del sistema de absorción funciona esencialmente bajo el mismo principio que el sistema de compresión de vapor. Sin embargo el compresor mecánico utilizado en el ciclo VCC, es reemplazado por un compresor térmico en el sistema de absorción. El compresor térmico consiste en el absorbedor, el generador, la bomba de solución y la válvula de expansión. La característica atractiva del sistema de absorción es que cualquier tipo de fuente de calor, incluido el calor solar y el calor residual, puede utilizarse en el desorbedor.

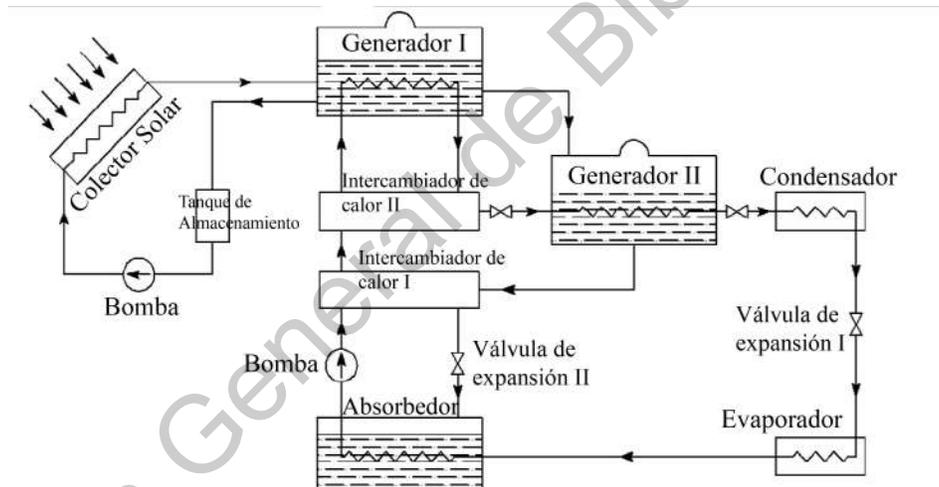


Figura 1.5: Sistema de refrigeración solar por absorción de doble efecto (Sarbu y Sebarchievici, 2015).

Los ciclos magnético, termoacústico y termoelástico se encuentran aún en pruebas experimentales. La refrigeración magnética es una alternativa potencialmente ecológica a la tecnología de compresión de vapor porque no utiliza un refrigerante gaseoso (Engelbrecht et al., 2011). El ciclo termoeléctrico, de absorción y adsorción generalmente no se usan para refrigeradores ya que tienen un COP más bajo en comparación con las opciones de VCC. Sin embargo, el ciclo de adsorción es respetuoso con el medio ambiente, además de ser de bajo costo y con muy pocos requisitos de mantenimiento (Sur y Das, 2010).

A pesar de las ventajas que podrían tener estos tres ciclos previamente mencionados, podemos encontrar en trabajos anteriores con refrigeración por absorción, como el de Rivera y Rivera (2003), donde el COP en diferentes pruebas del sistema fue muy bajo, sus valores oscilaron entre 0.15 y 0.40. En Balamuru et al. (2000), lograron un COP de 0.2 hasta 0.5. Otro ejemplo más reciente es el de Zhai et al. (2011) en el cual realizaron una revisión sobre trabajos realizados con refrigeradores con sistema de absorción. Los sistemas que revisaron fueron de efecto simple, doble y triple efecto. En los cuales lograron encontrar un COP máximo de 0.7, en sistemas de efecto simple.

Por otro lado en el ciclo de adsorción el problema del COP bajo es el mismo, en Wang (2001) el máximo COP que se encontró en la experimentación fue de 0.8. En González y Rodríguez (2007) el máximo valor fue de 0.096. En el caso del refrigerador termoeléctrico, se ha encontrado en Min y Rowe (2006) valores del COP como mínimo de 0.3 y máximo de 0.5. En cambio el ciclo VCC, el cual usan actualmente los refrigeradores domésticos, cuenta con valores de COP de 2.28 a 2.51 según el estudio de El-Bahloul et al. (2015), donde señalan que puede mejorar dependiendo de los componentes que lo integren, el diseño de estos y del tipo de refrigerante que este ciclo utilice.

Es por eso que, de acuerdo a la literatura previamente mencionada, el VCC es el ciclo con mayor COP y por lo tanto el más viable con el cual experimentar, es por eso que fue elegido para este trabajo.

El presente estudio consiste en la modificación de un componente importante en el ciclo VCC, uno de los cuales es el compresor del ciclo. En esta experimentación será sustituido por un compresor automotriz y se le acoplará un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) que lo impulse. El sistema que se presenta a continuación es alimentado por una fuente de

24V de corriente directa (CD). Con esta modificación se pretende obtener un mayor rendimiento en el refrigerador y un aumento en la eficiencia energética, reduciendo el consumo que se tiene normalmente en el sector doméstico y microempresarial, al hacer uso de una fuente de CD la cual puede ser una batería, una fuente o un panel solar y dejando de utilizar el voltaje monofásico de corriente alterna (CA) proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Dirección General de Bibliotecas UAQ

II. ANTECEDENTES

El ciclo de compresión de vapor (VCC) es el más utilizado actualmente en refrigeradores domésticos (Cengel y Boles, 2011). Este ciclo tiene su origen en 1834 cuando Jacob Perkins, inventor, ingeniero mecánico y físico estadounidense, solicitó una de las primeras patentes para el uso de una máquina práctica de fabricación de hielo, la cuál era el primer refrigerador con ciclo de compresión de vapor registrado (Puebla, 2005). Se fabricó un modelo utilizable de esta máquina, pero nunca se produjo comercialmente. En 1850, Alexander Twining empezó a diseñar y construir máquinas de hielo por compresión de vapor usando éter etílico, el cual es un refrigerante comercialmente usado en los sistemas por compresión de vapor. Al principio los sistemas comerciales eran muy grandes y solo se requerían para usos como producción de hielo en cantidades grandes, producción de cerveza y conservación de alimentos. Fue hasta 1930 que con las mejoras continuas se hizo posible contar con mejores sistemas VCC que resultaban eficientes, pequeños, confiables y económicos (Cengel y Boles, 2011).

Este ciclo cuenta con cuatro procesos termodinámicos. Cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro experimentado por un sistema es un proceso y la serie de estados por los que pasa un sistema durante este proceso es una trayectoria del proceso (Cengel y Boles, 2011). Si no se tienen en cuenta las irreversibilidades dentro del evaporador y condensador del VCC, no hay caída de presión por rozamiento y el refrigerante fluye a presión constante en los dos intercambiadores de calor. Si la compresión se produce sin irreversibilidades y se desprecia además la transferencia de calor al ambiente, la compresión es isoentrópica.

La Figura 2.1 muestra los procesos termodinámicos de este ciclo:

- Proceso 1-2: Compresión isoentrópica del refrigerante desde el estado 1 hasta la presión del condensador en el estado 2.
- Proceso 2-3: Transferencia de calor desde el refrigerante que fluye a presión constante en el condensador. El refrigerante pasa y sale como líquido en el estado 3.
- Proceso 3-4: Proceso de estrangulación desde el estado 3 hasta la mezcla bifásica líquido-vapor en 4.
- Proceso 4-1: Transferencia de calor hacia el refrigerante que fluye a presión constante a través del evaporador hasta completar el ciclo.

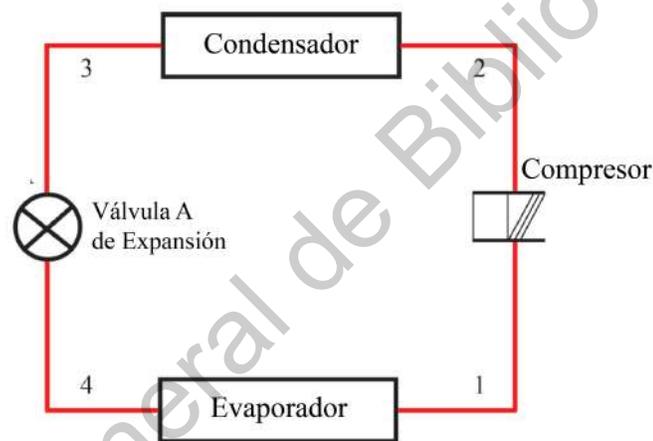


Figura 2.1: Esquema del ciclo de compresión de vapor (VCC) (Megdouli et al., 2017).

Con las condiciones mencionadas anteriormente, como una compresión sin irreversibilidades y un refrigerante fluyendo a una presión constante se obtiene un ciclo como el mostrado en la Figura 2.1. Todos los procesos mencionados anteriormente son internamente reversibles, excepto la estrangulación. A pesar de este proceso irreversible, el ciclo se conoce comúnmente como ciclo ideal de compresión de vapor (Cengel y Boles, 2011).

De acuerdo con el trabajo de Moran (2018), donde realizó la descripción y análisis de un ciclo VCC, las transferencias de calor en un ciclo como el VCC de la Figura 2.1 se toman positivas en el sentido contrario a las manecillas del reloj, es por eso que la numeración se torna de esa manera. Se considera también que dicho sistema trabaja en situación estacionaria.

Moran (2018) mostró un análisis de las transferencias de trabajo y calor del VCC. Ignoró las energías cinética y potencial para realizar su análisis. Este se muestra a continuación:

- Primero se comienza por el evaporador, donde se produce el efecto frigorífico. El calor se transfiere desde el espacio a enfriar hacia el refrigerante. A su paso por éste componente, el refrigerante se evapora. Para el volumen de control que incluye el evaporador, los balances de masa y energía dan el calor transferido \dot{Q}_e por unidad de masa de refrigerante \dot{m} .

$$\frac{\dot{Q}_e}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad (2.1)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico del refrigerante. El calor transferido \dot{Q}_e se define como capacidad de refrigeración y en el sistema internacional de unidades (SI) se expresa en kilowatts (kW). Las entalpías h_1 y h_4 son las correspondientes a los estados denotados en sus subíndices, basándonos para este análisis en el diagrama mostrado en la Figura 2.1.

- El refrigerante pasa del evaporador al compresor y es comprimido a una presión relativamente alta. Suponiendo que éste opera adiabáticamente, los balances de masa y energía, para el volumen de control que incluye al compresor nos da como resultado:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad (2.2)$$

En este caso la Ecuación 2.2 es el trabajo que entra \dot{W}_c por unidad de masa \dot{m} de refrigerante. Las entalpías h_2 y h_1 son las correspondientes a los estados denotados en sus subíndices.

- Posteriormente el refrigerante pasa a través del condensador, donde se condensa y existe una transferencia de calor desde el refrigerante al medio que lo enfría. Para el volumen de control que incluye la parte del refrigerante en el condensador, el calor transferido desde el refrigerante \dot{Q}_s por unidad de masa de este es:

$$\frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad (2.3)$$

Las entalpías h_2 y h_3 son las correspondientes a los estados denotados en sus subíndices.

- Finalmente, el refrigerante en el estado 3 entra en la válvula de expansión y se expande hasta la presión del evaporador. Este proceso se modela normalmente como un proceso de estrangulación por lo que:

$$h_4 = h_3 \quad (2.4)$$

La presión del refrigerante disminuye en la expansión adiabática irreversible y va acompañada de un aumento en la entropía específica. El refrigerante sale de la válvula en el estado 4 como una mezcla líquido-vapor.

En el sistema de compresión de vapor, la potencia de entrada es igual a la potencia del compresor, ya que la válvula de expansión no maneja potencia de entrada o salida, también por esto las entalpías en los estados 3 y 4 se mantienen constantes.

Utilizando las ecuaciones introducidas anteriormente podemos expresar la eficiencia del ciclo VCC mediante el coeficiente de rendimiento, el cual se denota como COP por sus siglas en inglés *coefficient of performance*.

Ya que el objetivo de un refrigerador con VCC es remover calor de un espacio refrigerado, lo que requiere de un trabajo de entrada. Entonces utilizando las expresiones anteriores obtenemos (Moran, 2018):

$$COP_R = \frac{\frac{\dot{Q}_e}{\dot{m}}}{\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (2.5)$$

Expresado de otra manera:

$$COP_R = \frac{\text{Temperatura deseada}}{\text{Trabajo requerido}} \quad (2.6)$$

Las ecuaciones mostradas hasta este momento pueden utilizarse para analizar ciclos de refrigeración ideales como el de la Figura 2.1. Sin embargo, también podemos utilizarlas para ciclos VCC reales en diferentes condiciones como irreversibilidades en el compresor, evaporador y condensador. Dichas irreversibilidades tienen un efecto significativo en el rendimiento global del ciclo, pero es necesario para los cálculos a realizar, en ciclos ideales, no considerarlas. También es importante mencionar que no hay cambios de energía o de alguna propiedad durante un ciclo completo. Sin embargo, puede haber adición o extracción de trabajo, que es la esencia de los dispositivos cíclicos (Rolle, 2006).

Actualmente la refrigeración es necesaria en la vida cotidiana, no solo para resguardar alimentos en el ámbito doméstico, si no también para otros usos que requieren alto consumo de energía, por ejemplo: El uso en pequeños negocios para el resguardo de bebidas, alimentos en grandes cantidades, lácteos y en la industria alimentaria. El inconveniente en esos casos es el consumo de energía de estos ciclos ya que es relativamente alto (Opoku et al., 2016), además de que en el VCC el compresor es uno de los componentes más caros (Choi et al., 2018). Debido a todo esto se buscan alternativas para la reducción de consumo energético y de costos.

Kattakayam y Srinivasan (2000) presentaron el rendimiento de enfriamiento, calentamiento y estabilidad de un refrigerador doméstico de 100 watts (W) de corriente alterna operado por un panel solar fotovoltaico (SPV), un banco de baterías y un inversor. En el documento se muestra que no hay degradación en el rendimiento cuando se utiliza una fuente de CA de forma de onda no senoidal para operar el refrigerador, aunque esto puede causar un ligero calentamiento en el compresor. El registro de las temperaturas en varios puntos del refrigerador se proporciona para el estado estacionario de este, el estado de enfriamiento, calentamiento, apertura periódica de la puerta y fabricación de hielo. En el presente estudio se presentó un diagrama de flujo de energía para verificar la operación del refrigerador en un día soleado y se identificaron las fuentes de pérdida. Además en el estudio se menciona que el COP del refrigerador era de 0.92, basado en la potencia instantánea durante el ciclo de encendido del refrigerador. Pero si se considera el consumo total de energía del refrigerador durante el día y contando los ciclos de encendido y apagado, el consumo de energía reveló que el COP fue realmente de 2.85. Por lo cual podemos decir que el refrigerador operado con

el método de los autores tiene un alto rendimiento.

Tijani et al. (2002b) presentaron uno de los primeros estudios sobre refrigeración termoacústica empleando la teoría termoacústica lineal. Introdujeron una estrategia de diseño en forma de una guía para el diseño y construcción de refrigeradores termoacústicos, además se discutió acerca de como optimizar el enfriamiento en las secciones del refrigerador. Por otro lado Tijani et al. (2002a) mostraron la construcción y el rendimiento de un refrigerador termoacústico. En la fabricación se utilizaron materiales específicos y se contó con un control de mezcla de gas, intercambiadores de calor y un resonador. El máximo valor de COP que se obtuvo en este estudio fue de 1.53.

Lu y Ding (2006) implementaron una estrategia de control combinando la ejecución de la temperatura y el tiempo en un refrigerador-congelador de ciclo de dos circuitos con evaporadores paralelos. En el estudio mencionaron que un refrigerador-congelador (RF) de ciclo de dos circuitos con evaporadores paralelos es más eficiente que un RF de un solo circuito. También señalaron que la cantidad de alimentos en los compartimientos de un refrigerador doméstico influye en la temperatura y que para resolver este problema se implementó la nueva estrategia de control basada tanto en el control de temperatura como en el control de ejecución del tiempo. Las reglas para determinar el tiempo máximo de activación del ciclo del compartimiento del congelador (FFC) y el del ciclo del compartimiento de alimentos frescos (FZC) se presentaron en base a análisis teóricos.

Lemmini y Errougani (2007) realizaron una experimentación de un refrigerador de adsorción solar en el país de Marruecos. El refrigerador propuesto en el estudio utilizó el par de metanol y carbon activado y fue construido y probado experimentalmente en el laboratorio solar de la facultad de ciencias de Rabat, la capital de Marruecos y la cual cuenta con un clima mediterráneo. El refrigerador de adsorción solar fue compuesto principalmente por un colector que almacenó el adsorbente, un evaporador y un condensador. Los resultados mostraron que el refrigerador obtuvo un buen rendimiento en Rabat. La unidad produjo frío incluso en días lluviosos y nublados. Manejaron un COP de .05 a 0.8.

Modi et al. (2009) presentaron la fabricación, experimentación y simulación para la conversión de un refrigerador doméstico tradicional a uno de CD. Para el estudio se utilizó un refrigerador de 165 litros (L) de capacidad, se rediseñó agregando un banco de baterías, un

inversor y un transformador, además de ser alimentado con paneles solares. El estudio les dió como resultado que el COP disminuía con el tiempo de la mañana a la tarde y se observaba un máximo de 2.102 a las 7 AM. Las simulaciones sobre la viabilidad económica del sistema para las condiciones climáticas se llevaron a cabo en la ciudad de Jaipur (India).

Axaopoulos y Theodoridis (2009) presentaron el diseño y rendimiento experimental de un congelador fotovoltaico sin batería. Con el propósito de ser amigables con el medio ambiente los autores decidieron omitir el uso de baterías de alimentación del congelador y que así se pudiera utilizar de manera independiente en áreas remotas, en contraste con el estudio de Modi et al. (2009) en el cual eran necesarias. El prototipo contó con 4 compresores alimentados mediante paneles fotovoltaicos y un controlador para un arranque sencillo que proporcionó al sistema un seguimiento de potencia máxima y administración de energía para los cuatro compresores.

Liu et al. (2010) presentaron en su estudio tres formas de conexión diferentes para los ciclos de refrigeración híbrida de compresión-inyección. Se midió la presión en el conector de los tres eyectores y el consumo de potencia y se compararon las prestaciones de las tres formas de conexión diferentes para la combinación de compresor-inyección. Los resultados para el estudio mostraron que para el sistema de ciclo de refrigeración híbrido cruzado-regenerativo de inyección-inyección, la pérdida de calor en el procesamiento del acelerador se redujo de manera efectiva por un eyector. El consumo de energía del prototipo del frigorífico fue de 0.655 kWh diarios, lo que les indicó una reducción del consumo de energía del 7.75 %.

Tušek et al. (2010) presentaron el desarrollo y construcción de un prototipo de un refrigerador magnético con imán rotatorio. Sin embargo no se habla de un coeficiente de rendimiento que valide la efectividad del nuevo prototipo. Aun así presentaron una tabla de las ventajas y desventajas que obtuvieron al realizar las pruebas.

Yoon et al. (2011) implementaron el ciclo de dos circuitos con evaporadores paralelos, mostrado en la Figura 2.2, para un refrigerador doméstico, el cual mostró un ahorro de energía en comparación con un ciclo de un solo evaporador. El objetivo de este estudio fue investigar los efectos del refrigerante, el tubo capilar y la recuperación del refrigerante en

el rendimiento de un ciclo paralelo. Cuando se optimizó el ciclo paralelo en términos de la carga de refrigerante y el diámetro del tubo capilar R, el consumo de energía se redujo en un 7.8 % en el ciclo de dos circuitos.

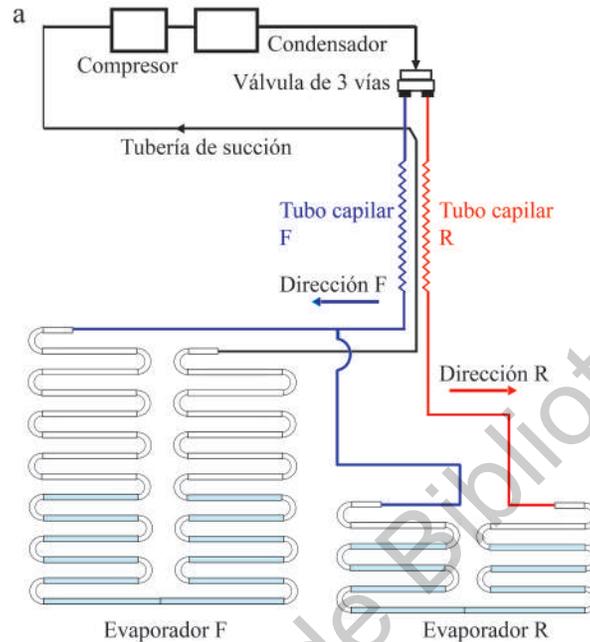


Figura 2.2: Diagrama del ciclo de doble evaporador (Yoon et al., 2011).

Cheng et al. (2011) presentaron en su investigación experimental un refrigerador doméstico con condensadores de almacenamiento de calor hechos con material de cambio de fase (PCM). Ellos investigaron las características de un refrigerador novedoso y uno ordinario bajo las condiciones de la prueba estándar de la organización internacional para la estandarización (ISO). Para el refrigerador novedoso, parte del calor de condensación se almacenó en el PCM estabilizado en forma durante el tiempo de encendido y se descargó al ambiente mientras el compresor estaba apagado. Por lo tanto, la disipación de calor del nuevo refrigerador fue continua durante un ciclo completo (incluyendo un período sucesivo de tiempo y tiempo de inactividad), diferente de la disipación de calor intermitente de la configuración ordinaria. Los experimentos de este estudio demostraron que el nuevo refrigerador pudo aumentar la eficiencia energética en aproximadamente un 12 %. La desventaja de este tipo de aumento en la eficiencia del refrigerador es que el costo que tuvo fue más elevado que el de un refrigerador ordinario. El nuevo refrigerador funcionaba a una temperatura de

condensación menor, a una temperatura de evaporación más alta y a un grado de subenfriado superior. En consecuencia, el nuevo refrigerador tuvo un mayor COP.

Engelbrecht et al. (2011) realizaron una comparación de los tres candidatos para ser el material magneto calorífico del ciclo de refrigeración magnética. Estos tres materiales son la combinación hecha por tres diferentes materiales intermetálicos $La(Fe, Co, Si)_{13}$, materiales del tipo cerámico como $(La, Ca, Sr)MnO_3$ y Gadolinio (Gd). El estudio comprobó que con el material que se tuvo un mayor rango de temperatura sin carga fue el Gd , sin embargo la combinación de materiales con la que se experimentó y contó con un mayor rendimiento fue la de $La(Fe, Co, Si)_{13}$.

Otanicar et al. (2012) presentaron una evaluación económica y ambiental a cerca de las perspectivas actuales del enfriamiento solar. Plantearon diferentes formas de producción de frío por medio de energía de paneles fotovoltaicos y además resaltaron la importancia de la utilización de energías alternas. Se mostraron diagramas del sistema de producción de frío con paneles fotovoltaicos. Mencionaron que los sistemas de compresión de vapor poseen los coeficientes de rendimiento más altos y que por eso es útil y viable trabajar con ellos.

Rasti et al. (2012) presentaron en su trabajo un estudio de mejora del índice de eficiencia energética del refrigerador doméstico utilizando un refrigerante de mezcla de hidrocarburos. En su experimentación sustituyeron refrigerante del tipo R134a por refrigerante del tipo R436A en un refrigerador doméstico de ciclo de compresión de vapor de 238L con evaporador único y sin ninguna modificación en el ciclo de refrigeración. El compresor del refrigerador se cargó con los dos refrigerantes en cantidades diferentes y se midió el consumo de energía del refrigerador durante la operación y las temperaturas en diferentes puntos del refrigerador. Los resultados del experimento mostraron que usando el refrigerante R436A el consumo por día se redujo un 13 %, mientras que con el R134a solo un 5.3 %. Por lo que se comprobó que sustituyendo el tipo de refrigerante se tiene una pequeña mejora en el consumo de energía.

Hernández et al. (2012) desarrollaron una red neuronal artificial directa e inversa (ANN y ANNi) para predecir el COP requerido de un sistema de refrigeración solar intermitente para la producción de hielo en diversas condiciones experimentales. El amoníaco/nitrato de litio se usó como fluido de trabajo considerando diferentes concentraciones de solución.

El ciclo utilizado fue el de absorción. Los parámetros de entrada utilizados fueron: la concentración de la solución, la temperatura del agua de refrigeración, la temperatura de generación, la temperatura ambiente, la presión de generación y la radiación solar. El análisis de sensibilidad mostró que todas las variables de entrada estudiadas tienen efecto en la predicción COP. El rendimiento de COP también se determinó invirtiendo una ANN para calcular el parámetro de entrada desconocido a partir de un COP requerido. Debido a la alta precisión y el corto tiempo de computación, esta metodología fue útil para simular y optimizar el sistema de refrigeración solar.

Hamed et al. (2012) presentaron la optimización de un refrigerador de absorción solar. El sistema es una estación generadora de frío y fue impulsada con energía solar. Los principales elementos del ciclo son: un espacio refrigerado, un frigorífico de absorción y un colector solar. También desarrollaron un modelo matemático. En su trabajo combinaron los principios de termodinámica y transferencia de masa y calor. La optimización del presente estudio fue acerca de minimizar el tiempo para alcanzar los rendimientos máximos. Los resultados se presentaron en tablas normalizadas para aplicaciones generales. Como resultado, el modelo fue una herramienta útil para la simulación, el diseño y la optimización de sistemas de energía basados en colectores solares.

Gupta et al. (2014) presentaron un trabajo que se basó en el estudio del tamaño del panel fotovoltaico, la capacidad de la batería y el espesor de aislamiento para un refrigerador doméstico operado con paneles fotovoltaicos. El estudio tuvo como propósito mostrar los valores óptimos y así poder tener un refrigerador con una buena eficiencia que trabajó sin necesidad de estar conectado a la energía eléctrica. Debido a que en India algunas comunidades no cuentan con ella y en esos casos las vacunas no se pueden preservar, ocurrieran muchas muertes en esas zonas. La electricidad generada por los paneles fotovoltaicos pudo usarse para impulsar el sistema de refrigeración. Se utilizó también un software de simulación transitoria para simular el sistema de refrigeración basado en SPV. El sistema de este estudio se conformó de un refrigerador con capacidad de 50 L, banco de baterías de 24V, inversor de 1 kVA y SPV con controlador de carga. Los resultados concluyeron que fue factible operar un refrigerador (25 mm de espesor de aislamiento) en SPV sin alimentación de red con 320 matrices de panel con capacidad de batería de 50 Ah. A medida que el espesor del aisla-

miento aumentó a 50 mm, la capacidad del panel de 200W fue suficiente para alimentar el refrigerador (Gupta et al., 2014).

Tina y Grasso (2014) implementaron un sistema de monitoreo remoto para plantas de energía fotovoltaica autónomas, mostraron el estudio en el caso de un refrigerador al aire libre y que fue alimentado con energía fotovoltaica. Describieron en el documento una arquitectura de monitoreo. Adoptaron una aplicación web que permitió un monitoreo y control en línea de instalaciones remotas. Los informes diarios se elaboraron y se enviaron al operador del sistema. Estos datos pudieron analizarse fuera de línea para calcular los índices de rendimiento energético y los valores estadísticos.

Yuan y Cheng (2014) propusieron un novedoso método de optimización que combinó el modelo dinámico del refrigerador y el algoritmo genético NSGA-II para aumentar el rendimiento general del refrigerador doméstico. Un novedoso refrigerador con condensadores de almacenamiento de calor y un refrigerador común con condensadores convencionales de pared caliente se optimizaron con el método de objetivos múltiples para minimizar el costo total del consumo de energía. Con el algoritmo que utilizaron lograron reducir el consumo energético del refrigerador y mejorar su eficiencia, sin embargo en este trabajo no se habla de aprovechamiento de energías alternas utilizando paneles para la alimentación del refrigerador, si no que se utiliza un refrigerador tradicional de corriente alterna.

Monfared et al. (2014) presentaron un estudio para demostrar si un refrigerador magnético con imanes permanentes es más amigable para el medio ambiente que uno con compresor de vapor. La comparación reveló que la refrigeración magnética tiene mayores impactos ambientales, principalmente debido al uso de metales raros utilizados en el material del imán. Se intentó compensar este defecto con la reutilización de los materiales del refrigerador magnético, aun así debido a esto y al bajo coeficiente de rendimiento se descartó que el refrigerador magnético sea un buen sustituto del refrigerador tradicional de compresión de vapor.

El-Bahloul et al. (2015) realizaron un estudio basado en el rendimiento y dimensionamiento de un refrigerador con el ciclo tradicional VCC, con un motor de CD alimentado con energía solar y con almacenamiento térmico en zonas áridas. El estudio llevó a cabo una investigación experimental sobre el rendimiento del refrigerador con motor de CD a través

de pruebas interiores y exteriores, con/sin almacenamiento térmico y con/sin carga en áreas áridas y cálidas. A través de este estudio se estableció un modelo teórico para evaluar el rendimiento del refrigerador cuando se opera bajo diferentes condiciones ambientales del punto de diseño.

Sarbu y Sebarchievici (2015) presentaron una revisión general de los sistemas de refrigeración de absorción y adsorción. Estas son tecnologías de sorción (sistemas abiertos o sistemas cerrados). Estas tecnologías no en especie funcionan con energía solar. Con base en el COP, los sistemas de absorción son preferibles a los sistemas de adsorción, sin embargo en la mayoría de los casos, ambas no superan la unidad de COP. Esta revisión mostró también nuevos enfoques para el mejoramiento y el aumento de la eficiencia y la sostenibilidad de los ciclos básicos de adsorción, como el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía híbrida o térmica. Esta investigación señaló que las tecnologías de refrigeración por sorción cerrada impulsadas por energía solar pueden ser alternativas atractivas no solo para satisfacer las necesidades de aire acondicionado, refrigeración, fabricación de hielo, almacenamiento de energía térmica o calefacción híbrida y refrigeración, sino también para satisfacer las demandas de conservación de energía y protección del medio ambiente.

Yusufoglu et al. (2015) presentaron un trabajo en el cual se enfocaron en reducir el consumo de energía eléctrica en los edificios residenciales. Esto se logró mediante la introducción de materiales PCM lo cual fue un nuevo enfoque para mejorar el rendimiento de los refrigeradores. En el estudio tanto como en la experimentación se utilizaron 4 diferentes PCM y 2 modelos de refrigeradores diferentes. Se optimizó el tiempo de encendido/apagado del compresor y por lo tanto se logró una mayor eficiencia energética. El uso de solo 0.95 kg de PCM resultó en un ahorro de energía del 9.4 %. La investigación mostró que el uso de PCM en los refrigeradores domésticos es claramente un método rentable de ahorro de energía y reducción de las emisiones nocivas.

Yuan et al. (2015) realizaron el estudio experimental de un prototipo de un refrigerador doméstico en miniatura, utilizando el ciclo de compresión de vapor. Las dimensiones del refrigerador son: $100\text{mm} \times 190\text{mm} \times 100\text{mm}$. Este trabajo integró un compresor rotativo de velocidad variable en miniatura con una válvula de expansión electrónica en miniatura (EXV), la cual funcionó en modo de modulación por ancho de pulso (PWM). Además, se

desarrolló un nuevo tipo de evaporador de aletas de microcanales en miniatura con tecnología de unión al vacío y se aplicó un condensador de microcanal de flujo paralelo de aluminio soldado. Los experimentos demostraron que la operación del sistema fue confiable y los resultados mostraron que tiene una capacidad de enfriamiento de 260W. El sistema pudo alcanzar un COP de 1.62 y la eficiencia reversible es 0.324. Como se sabe, la eficiencia reversible revela esencialmente la irreversibilidad que existe en la transferencia de calor bajo la diferencia de temperatura, la expansión en la válvula de expansión (EXV) y la compresión en el compresor. Un ejemplo es cuando la temperatura ambiente y la temperatura del agua están próximas, la temperatura de condensación disminuye y la temperatura de evaporación aumenta, por lo tanto la pérdida de energía del sistema disminuye y la eficiencia reversible aumenta.

Ndoye et al. (2015) presentaron un estudio numérico del rendimiento energético de los nanofluidos utilizados en bucles secundarios en sistemas de refrigeración, esto mediante un modelo matemático el cual predijo su rendimiento. El modelo se basó en una combinación del método de Efectividad-Número de unidades de transferencia y la clásica transferencia de calor y las correlaciones hidrodinámicas de fluidos. El modelo se validó utilizando datos publicados y se demostró que las correlaciones clásicas existentes tienen éxito para representar los comportamientos de transferencia de calor y pérdida de presión de los nanofluidos en los intercambiadores de calor, cuando se toman en cuenta las propiedades térmicas y físicas efectivas. Este estudio mostró el gran potencial de los nanofluidos para mejorar el enfriamiento.

Un enfoque confiable y eficiente desde el punto de vista energético para proporcionar las necesidades de refrigeración fue un desafío importante en la mayoría de los países en desarrollo, en particular en el África subsahariana (Opoku et al., 2016). Por tal motivo mostraron un trabajo de una evaluación tecnoeconómica comparativa de un refrigerador de corriente directa y un refrigerador de corriente alterna convencional. Ambos alimentados por un sistema fotovoltaico. Obtuvieron resultados experimentales que muestran un mejor desempeño de un refrigerador de corriente continua.

Xu y Wang (2016) presentaron una revisión de los ciclos de refrigeración por absorción. Resumieron los acoplamientos para la construcción del ciclo de absorción. En esta revisión se mencionaron los diferentes tipos de ciclos de absorción y su funcionamiento así

como las configuraciones y los COP de cada uno. Se mencionó que el coeficiente teórico más alto fue de 3.0 unidades, sin embargo en la experimentación práctica y en base en otros estudios se construyó una tabla con las diferentes configuraciones y tipo de ciclo, en la cual se mostró que la mejor configuración fue: Ammonia/LiNO₃ con un COP de 1.5 unidades.

Goyal et al. (2016) presentaron una descripción general de la teoría de refrigeración por adsorción, ya que señalaron que ha mostrado significancia en los últimos años, gracias a que tiene un funcionamiento silencioso, no corrosivo y amigable con el medio ambiente, ya que utiliza como fuente de calor la energía solar. Aunque se diseñaron diferentes tipos de sistemas de adsorción, los autores mencionaron que esta tecnología no está lista para competir con los sistemas actuales de compresión de vapor. Además se discutieron los intentos de las empresas por mejorar el rendimiento de los sistemas de adsorción y mantener su presencia en el mercado, pero sus limitaciones parecieron difíciles de superar.

Aprea et al. (2016) implementaron un refrigerador magnético de imán permanente rotatorio utilizando como refrigerante magnético el metal Gadolinio y agua desmineralizada como líquido regenerativo. Se realizaron pruebas de funcionamiento del prototipo en las temperaturas de 22°C hasta 32°C mostrando un COP de 1.80 y 1.18 respectivamente. Se observó en los resultados que cuando se sometió a mayor temperatura el COP disminuía.

Zolpakar et al. (2016) realizó una revisión de trabajos a cerca del refrigerador termoacústico de onda estacionaria resaltando que en este tipo de sistema no es necesario el uso de refrigerantes y que además es amigable con el medio ambiente. En esta revisión se presentó una tabla comparativa de diferentes autores sin embargo no se mostró el COP obtenido por ellos. Solo se mencionó el método termoacústico que utilizaron y si mejoraron el COP del método de onda estacionaria.

Zolpakar et al. (2017) experimentaron con una batería impresa en 3D para un prototipo de refrigerador termoacústico. Mencionaron que el rendimiento de la batería, al ser el centro del sistema, influyó directamente en el rendimiento del refrigerador. Sus resultados sobre el rendimiento de la batería termoacústica de onda estacionaria fueron documentados. Los parámetros para diseñar su modelo de batería fueron optimizados con un algoritmo genético de objetivos múltiples. La impresión 3D de la pila minimizó el error, eliminó las inconsistencias y redujo el tiempo de producción del producto final. La consistencia en la producción

optimizada de la pila es crucial para la realización de sistemas de alto rendimiento (Zolpakar et al., 2017).

Kishor Verma y Dondapati (2017) presentaron una propuesta de un sistema fotovoltaico solar para el uso en refrigeradores domésticos con el ciclo tradicional de compresión de vapor. Mencionaron que la potencia necesaria para el refrigerador doméstico se ha estimado como 356 Wh/día, por esta razón utilizaron para el requisito de potencia específica, un panel requerido de 1.3 módulos de 100W. Utilizaron también un inversor, que se necesita para convertir la CD a la CA utilizada en la configuración experimental, este es de aproximadamente 463.32 W. Además, la capacidad de la batería que se utilizó en este sistema, de acuerdo con el requisito específico, fue de 58.23 amperes-hora (A-h). El controlador de carga solar fue el componente importante que operó a 12 A con 12V. El sistema solar fotovoltaico mencionado pudo generar 47085 kWh/año.

Daffallah et al. (2017) mostraron una evaluación experimental de un refrigerador de CD fotovoltaico con carga y sin ella y bajo diferentes condiciones de funcionamiento. La configuración experimental consistió en un panel fotovoltaico, una batería de 12V, un controlador de carga y un refrigerador de 158 L. El refrigerador del presente estudio funcionó con un compresor de 12V DC y se le incorporó un convertidor CA/CD como fuente de respaldo. Se mencionó en el estudio que la temperatura del refrigerador se ajustó a través de un termostato y se investigaron los efectos de las variaciones de la configuración del termostato en el rendimiento del refrigerador. Se realizaron pruebas más detalladas para el funcionamiento del refrigerador sin panel fotovoltaico (solo batería) y con convertidor CA/CD. El estudio tuvo como propósito comprobar que la posición de ajuste del termostato tuvo un gran efecto en el consumo de energía del refrigerador.

Ouali et al. (2017) estudiaron la influencia del control térmico sobre la eficiencia energética del refrigerador doméstico que fue alimentado por energía solar mediante SPV. En este estudio se resaltó la importancia de un control de temperatura en una visión a cerca del impacto ambiental y económico que este puede generar. Se mencionó que el consumo energético se vio afectado por la temperatura ambiente, la apertura de la puerta y la configuración del termostato.

Cheng et al. (2017) plantearon un análisis del rendimiento de ahorro de energía para el refrigerador doméstico con almacenamiento térmico de condensador y evaporador. Los rendimientos de transferencia de calor de los evaporadores y condensadores afectan significativamente la eficiencia de los refrigeradores domésticos (Cheng et al., 2017). Por lo cual en este estudio se propuso un refrigerador de almacenamiento de energía dual (DES) con condensador de almacenamiento de calor (HSC) y un evaporador de almacenamiento en frío (CSE). Se compararon los tres tipos de refrigeradores, el DES, HSC y el CSE y se obtuvo como resultado que el refrigerador DES tuvo ventaja sobre los otros dos tipos, ya que mostró un mejor rendimiento de ahorro de energía y así el ahorro de consumo eléctrico puede llegar a un 32 %. De acuerdo con los resultados de la simulación que se realizó también, el refrigerador DES combina la ventaja del refrigerador HSC y el refrigerador CSE, tiene un ciclo operativo más equilibrado y una mayor presión y temperatura de evaporación.

Yang et al. (2017) desarrollaron un dispositivo que combina operación y dispersión para investigar las características dinámicas de los nanofluidos de TiO_2 a base de amoníaco y agua. Incluyó por primera vez el estudio de la tensión superficial de un nanofluido. En el estudio se mostró que el proceso dinámico de circulación mejora la capacidad de suspensión de este. Además se agregó el dodecil benceno sulfonato de sodio y se analizó la capacidad de suspensión experimentalmente. Este estudio como muchos realizados en el tema de nanofluidos son parteaguas en demostrar qué nanofluido tiene mejores características para el inicio de los experimentos con refrigerantes para el nuevo método de refrigeración por nanofluidos refrigerantes.

Azmi et al. (2017) realizaron una revisión acerca del potencial que tiene el nanorefrigerante y el nano lubricante en el ahorro de energía de un sistema de refrigeración. Mencionaron estudios de diversos autores tomando en cuenta el tipo de refrigerante, de fluido utilizado y el tamaño de las nano-partículas aplicadas a cada caso. Se mencionó un aumento de cierto porcentaje de COP en los resultados de los trabajos revisados, sin embargo no se mencionó un valor numérico.

Daffallah (2018) presentó una investigación acerca del efecto que tiene la temperatura ambiente sobre el rendimiento de un refrigerador de CD fotovoltaico de 12V y 24V, bajo las condiciones de carga y sin carga, además de que el refrigerador se sometió a pruebas desde los 25°C hasta los 35°C, ajustando el termostato a diferentes rangos de operación. Se tomó en cuenta el tiempo de funcionamiento diario que tuvo el compresor del refrigerador, cabe mencionar que el ciclo de refrigeración que fue utilizado en el presente trabajo es el ciclo de compresión de vapor. El cuál es el ciclo tradicional de refrigeración. Se calculó también el consumo de energía del refrigerador en diversas condiciones de funcionamiento. Para que el estudio fuera un poco más específico, el autor señaló los consumos mensuales y anuales del refrigerador.

Choi et al. (2018) presentaron un estudio de revisión sobre los recientes avances que existen actualmente en las tecnologías de los ciclos de refrigeración. En su revisión hablaron de los ciclos actuales así como las alternativas de ciclos de refrigeración no en especie. Hicieron mención de que actualmente la mayoría de los refrigeradores se basan en un ciclo de compresión de vapor VCC, por lo que los diferentes tipos de VCC fueron comparados, estos fueron: ciclos de evaporador dual, ciclos de recuperación de pérdida de expansión y ciclos de múltiples etapas. El ciclo de VCC es el ciclo más utilizado por refrigeradores domésticos según este estudio y con un COP más alto. También en la revisión se habló de las tecnologías actuales no en especie como absorción, adsorción y termoeléctrica. Se señaló su bajo COP y poca eficiencia de estos ciclos, pero también se discute su potencial y sus ventajas.

Rincón-Casado et al. (2018) mostraron en su trabajo un modelo computacional para refrigeradores basados en efecto peltier, con el propósito de hacerlos competitivos para el sector doméstico. Este modelo simuló todo el sistema en estado transitorio, incluidos los módulos termoeléctricos, los intercambiadores de calor, los compartimientos aislados y los depósitos de agua fría y caliente. Además, se implementaron los efectos Peltier, Seebeck, Thompson y Joule dependientes de la temperatura. Se construyó un prototipo de refrigerador termoeléctrico para realizar la verificación y validación del modelo computacional. Se obtuvieron resultados por ejemplo: un COP por debajo de la unidad. Lo anterior hizo al prototipo poco competitivo comparado con las tecnologías de compresión de vapor.

You et al. (2018) presentaron una investigación reciente sobre refrigeración magnética. En dicha investigación procesaron materiales a base de Gd , en forma de cuña doble, para mejorar el rendimiento del refrigerador. Los resultados de esta investigación mostraron que los elementos en el estudio de los autores mejoraron la velocidad de transferencia de calor por convección y por lo tanto mejoraron la capacidad de refrigeración, el intervalo de temperatura de refrigeración máximo y el COP de los refrigeradores por este método, alcanzando un valor máximo en la experimentación de 2.5.

Sanukrishna et al. (2018) presentaron un estudio reciente sobre los nanorefrigerantes, los cuales son refrigerantes basados en nanotecnología. Son una mezcla estable de nanopartículas de metal, óxido, carbono y sus alótropos y refrigerantes. El desarrollo de nanorefrigerantes proporcionó una nueva perspectiva de transferencia de calor. El propósito de este estudio fue mostrar una visión completa de las propiedades termofísicas y rehológicas, los fenómenos de ebullición y condensación, las características de caída de presión, el comportamiento de agregación, las características de migración y degradación de diferentes nanorefrigerantes en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Experimentaron con la adición de nanopartículas en los refrigerantes y observaron que contribuyó a aumentar las características térmicas de transferencia de calor de los nanorefrigerantes y mejoró el COP del sistema, aunque los resultados que mostraron, incluyendo los de otros estudios previos no mostraron un COP de más de 1.

Darzi et al. (2018) estudiaron la caída de presión de condensación de nanofluido a base de refrigerante dentro de un tubo. En este caso eligieron el isobuteno como fluido base y se utilizaron partículas de CuO para preparar nanorefrigerante. Además como aceite lubricante para la dispersión de nanopartículas se utilizó aceite de poliéster. Se investigaron valores de flujo de masa, calidad de vapor y concentración de nanopartículas. Se obtuvo como resultado que teniendo un mayor flujo de nanopartículas mejoran la caída de presión por fricción. Además de aumentar la transferencia de calor.

Prashantha et al. (2018) presentaron el diseño de un refrigerador termoacústico con potencia de 50W, con altavoz que funcionó con helio y que utilizó la teoría termoacústica lineal. En el estudio discutieron la técnica de normalización dimensional y la variación del rendimiento de los intercambiadores de calor de apilamiento en espiral. Además de la optimi-

zación del resonador y la longitud de onda de un tercio. Además implementaron un sistema de resorte de gas de volumen trasero para mejorar el rendimiento del altavoz. Utilizaron el software DeltaEC para validar la experimentación. Obtuvieron un COP de 0.841 a 0.882.

Bhattad et al. (2018) presentaron una revisión a cerca de las nuevas tecnologías de nanofluidos para refrigeración. Resaltan en su investigación que el COP de un ciclo de refrigeración se puede lograr aumentar modificando los sistemas o las propiedades de los fluidos. También mencionaron que los llamados nanofluidos tienen excelentes propiedades termofísicas y que pueden ser fácilmente utilizados en sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Hicieron mención también que dichos nanofluidos deben prepararse y caracterizarse, además de que tienen propiedades como densidad, capacidad calorífica, viscosidad, conductividad térmica, tensión superficial, conductividad eléctrica, características de congelación, entre otras. Por último clasificaron los usos que se les puede dar a los nanofluidos en un ciclo de refrigeración, estos son: como refrigerante, lubricante y fluido secundario.

Soliman et al. (2018) mostraron una mejora del ciclo de compresión de vapor usando nanofluidos. Para esta experimentación se utilizaron nanomateriales de óxido de aluminio con una catidad de 15 % en el refrigerante del ciclo. Con esto obtuvieron que el consumo de energía del ciclo se redujo en 9.28 % además de un COP creciente desde 1.3 hasta 1.7.

Zhu (2018) propuso un nuevo concepto de modelo que consistió en la combinación del refrigerador de tubo de pulso y pistón con un refrigerador termoacústico, el concepto que se propuso en este estudio fue llamado por el autor máquina de pulso resonador. El modelo se simuló numericamente. En el resultado se mostró que el modelo pudo trabajar como un refrigerador o un motor en frío en función de la relación de volumen barrido del compresor de pistón de paso.

Monfared y Palm (2018) realizaron una investigación a cerca de la refrigeración magnética y sus requerimientos para lograr una mayor eficiencia energética. Señalaron que hasta el momento no se había logrado tal objetivo de superar a las tecnologías de compresión de vapor porque las propiedades de los materiales magnetocalóricos existentes son inadecuadas. Además investigaron las mejoras necesarias en las propiedades de los materiales antes mencionados. Utilizaron dos refrigeradores de compresión de vapor existentes como referencia para el rendimiento requerido, en cambio los refrigeradores magnéticos se simularon

utilizando un modelo numérico. Además de los requisitos que se encontraron, se necesitó una entropía adiabática en los materiales para superar a los sistemas de compresión de vapor.

Rostanzadeh et al. (2018) propusieron un nuevo ciclo de refrigeración compresión de vapor de dos evaporadores de doble bucle para satisfacer las demandas de aplicaciones de congelación y aire acondicionado que pueden emplearse en sectores empresariales y domésticos. Se sustituyó también la válvula de expansión por un expansor de eyector, esto para mejorar el rendimiento del ciclo desde el punto de vista termodinámico y termoeconómico. Además se experimentó con cuatro tipos de refrigerante (R717, R290, R600a y R134a) en donde se llegó a la conclusión por medio de la experimentación que desde el punto de vista termodinámico, termoeconómico y ambiental el R717 es el más recomendado. Los resultados que mostraron los autores fueron que al usar todas estas modificaciones en el ciclo propuesto la capacidad de congelación, la capacidad de aire acondicionado, el COP, la eficiencia energética y el costo unitario mejoraron.

Tartibu (2019) realizó una revisión sobre tecnologías alternativas de refrigeración, particularmente sobre la refrigeración termoacústica. Este tipo de refrigeración no utiliza refrigerantes por lo tanto es amigable con el medio ambiente. Este estudio resumió el desarrollo de refrigeradores termoacústicos de onda viajera. En la revisión se encontraron coeficientes de rendimiento desde 0.16 hasta 0.4. La mayoría de los estudios realizados se basaron en gran medida en el enfoque paramétrico, con un solo parámetro, mientras que los otros se mantienen constantes durante el proceso de optimización. Esto es el comienzo de un mayor uso de técnicas avanzadas de optimización.

Xu et al. (2019) propusieron una nueva estructura calentada por aceite de conducción de calor en el generador del ciclo y anillos de calentamiento eléctrico alrededor de la sección de extracción. La estructura propuesta en la investigación simuló las fuentes de calor distribuida y además pudo simular un generador de calor tradicional. Se analizó principalmente qué influencia tuvieron las diferentes distribuciones de calor. Los resultados mostraron que la utilización de las fuentes de calor aumentó con el incremento de calor en la sección de extracción y el COP se vio afectado negativamente debido al aumento de calor en la sección de desalojo. También cuando el sistema trabajó bajo el modo del generador de calor tradicional se logró alcanzar un COP de 0.38.

Zendehboudi et al. (2019) presentaron un estudio sobre el comportamiento del refrigerante R450A en el sistema de refrigeración por compresión de vapor y optimizaron las variables operativas para obtener un mejor COP. Para este propósito, se estableció un método de superficie de respuesta de acoplamiento de modelo de optimización multi-objetivo híbrido y un algoritmo genético clasificado no dominado II. Los primeros resultados les mostraron un consumo menor de energía eléctrica por parte del motor-compresor. En este estudio no se mencionaron las temperaturas del ambiente a las que fue sometido el refrigerador, pero sí se mencionó el COP que alcanzó el ciclo el cual fue de 0.99.

Rahpeima y Ebrahimi (2019) realizaron una investigación numérica a cerca del efecto que tienen los parámetros geométricos de la batería en el rendimiento de un refrigerador termoacústico, además de sus propiedades termofísicas. Un refrigerador termoacústico utiliza ondas de sonido para transmitir el calor de una zona fría a una zona caliente. La batería representó un papel fundamental en el rendimiento de estos sistemas. En este estudio se experimentó con diferentes geometrías y diferente material. Los parámetros de estudio fueron el grosor y la longitud de las placas y la distancia entre ellas. Las propiedades termofísicas que se estudiaron fueron la capacidad térmica y la conductividad térmica de la placa de apilamiento. Se analizaron muestras en 2D y se utilizó el software COMSOL en el cual el sistema mostró un COP máximo de 0.55.

De Carvalho et al. (2019) combinaron en este estudio el uso de refrigerantes mixtos de hidrocarburos y un ciclo de refrigeración de tanque de inyección alternativo con inyección de vapor (FTVI). Se estudiaron cuatro diferentes refrigerantes mixtos R170 (etano), R290 (propano), R600 (n-butano) y R600a (isobutano). El ciclo se simuló y optimizó para COP máxima. El uso de un FTVI condujo a una mejora de COP del 4 % al 36 % en comparación con el ciclo tradicional VCC. El porcentaje de aumento de COP fue calculado restandole el COP del ciclo VCC al COP obtenido con este método, dividido entre el COP del VCC y multiplicando el resultado por 100. El par R290 / R600 con 60/40 % en peso respectivamente presentó el COP máximo de 4.88.

Cao et al. (2019) mencionaron que los gases reales causan pérdidas de calor intrínsecas en el regenerador y degradan el COP del regenerador del ciclo de refrigeración. Se implementó un mecanismo de trabajo de imponer un flujo de DC en el regenerador de trabajo con un gas real. Se analizó el valor teórico del flujo de DC y su influencia en el COP fue mejorarlo hasta 10 veces más. Fue posible obtener un mayor COP en diferentes temperaturas de trabajo. Compararon su experimentación con literatura relevante para comprobar que su método tiene una forma potencial de incremento de COP en comparación con la literatura consultada.

Yang et al. (2019) realizaron su estudio basados en la utilización del motor termoacústico, ya que es un dispositivo eficiente para la recuperación de calor y es amigable con el medio ambiente. El motor consistió en tres etapas de bucle para conducir de una a cinco cargas con temperaturas menores a 200°C. El método de carga R-C se adoptó para medir potencia acústica de salida. Los resultados de su experimentación mostraron una mayor eficiencia térmica alcanzada de 9.6 % a una temperatura de 195°C cuando se instalaron cinco cargas y en el caso del ciclo de Carnot es de 25.6 % y fue la mayor alcanzada cuando se instalaron 4 cargas. Concluyeron que una mayor cantidad de cargas puede reducir la proporción de pérdida de potencia acústica y aumentar la proporción de potencia acústica de salida. Este trabajo fue un parte aguas para los posteriores estudios de motores termoacústicos y el aumento de su eficiencia.

II.1. Planteamiento del problema

En la actualidad uno de los principales problemas energéticos es el consumo excesivo de electricidad en los hogares y microempresas, ya que comúnmente los aparatos electrodomésticos son la principal fuente de consumo de energía. Prueba de ello es que el refrigerador es el aparato electrodoméstico que más energía consume, ya que la refrigeración demanda alta energía (Daffallah et al., 2017). La refrigeración responde por el 6 % de consumo de energía eléctrica alrededor del mundo (Choi et al., 2018).

Además del alto consumo de la energía, si se consulta la página oficial de la CFE podemos encontrar los precios asignados en las nuevas tarifas, los cuales están divididos en tres secciones que son: consumo de hogar, de negocio e industria. Estos precios son relativamente altos y variantes dependiendo de la estación del año y de la zona del país. Las tarifas comerciales están implementadas de 1 hasta la tarifa 1F. Como ejemplo tenemos que la tarifa 1 de consumo doméstico dice que se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo y que las cargas deben estar conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda. Por otro lado la tarifa 1F señala que es aplicada a un servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima de 33°C en verano. Estas variaciones de tarifa ponen en desventaja a las zonas cálidas del país con clima semi-árido donde en verano las temperaturas son más altas que las establecidas en dicha tarifa, por tanto el costo por consumo varía por la cantidad de refrigeradores o sistemas de climatización que se tengan en los hogares.

En el caso del COP de los refrigeradores actuales, este tiene variaciones dependiendo del ciclo de refrigeración con el cual cuentan. Actualmente el ciclo de compresión de vapor VCC es el más utilizado en refrigeradores domésticos y es el ciclo con más COP que hay actualmente, además de ser el más comercializado (Choi et al., 2018). Es por eso que se necesita obtener un COP alto del VCC utilizando CD como fuente de energía para alimentar este ciclo, que bien podría ser tomada de un panel fotovoltaico o de un bus de CD y así asegurar el aumento de eficiencia energética de este ciclo.

II.2. Justificación

El calentamiento global, la demanda de energía que aumenta año con año y que a su vez con ella aumenta la emisión de dióxido de carbono, además de la indisponibilidad general de energía eléctrica en algunas comunidades rurales de nuestro país, son razones para examinar con qué energías renovables contamos y también las nuevas tecnologías para los procesos regulares generales. Uno de los más utilizados y clasificado como el que más consume energía es la refrigeración. Por este motivo se requiere de energía alternativa y limpia con la cual se pueda alimentar el sistema de refrigeración y a su vez lo ayude a tener un buen rendimiento; es por eso que el uso de paneles fotovoltaicos, fuentes de CD o baterías de 12V o 24V son alternativas muy viables para esta aplicación. En el trabajo realizado por Ullah et al. (2013) nos mencionan que la energía solar y los paneles fotovoltaicos han sido, en las últimas décadas, una alternativa de energía para la refrigeración por compresión de vapor. Con la utilización de estas alternativas podemos dejar de depender de la corriente doméstica proporcionada por la CFE. Además como se vió en la sección anterior, las tarifas de consumo de la CFE son altas y variantes, lo cual no solo afecta al sector doméstico, si no también al sector microempresarial por el tipo de tarifa asignada.

La mayor ventaja de utilizar paneles solares para refrigeración es la construcción simple y la alta eficiencia general cuando se combina con un sistema de compresión de vapor convencional, ya que con una exhaustiva revisión de la literatura se concluyó que este ciclo de refrigeración cuenta con el más alto COP que puede llegar a más de las tres unidades (Harrington et al., 2018) y una alta eficiencia (El-Bahloul et al., 2015), por lo tanto es el ciclo idóneo para realizar este tipo de proyectos, además de que es el más utilizado en la actualidad para sistemas de refrigeración y el más comercializado e instalado en el mundo. Los sistemas solares fotovoltaicos para iluminación, bombeo de agua, refrigeración y telecomunicaciones están comprobados, están disponibles comercialmente y son económicamente viables (Daffallah et al., 2017).

Además los refrigeradores con ciclo de compresión de vapor pero que funcionan con CD porporcionada por los paneles fotovoltaicos, son muy caros. Sus precios oscilan entre los 400€, los más económicos y 853€, según la marca de refrigeradores FRIOBAT y van

desde 48L hasta 180L. También tenemos los refrigeradores de la marca SUNDANZER la cual cuenta con una variedad de precios que oscilan de \$11,000.00 PMX que son de 50L, hasta \$21,400.00 PMX con 165L con módulo FV y batería. Por lo que es necesario contar con un sistema de refrigeración el cual sea con corriente directa, alimentado por paneles fotovoltaicos o alguna otra fuente de corriente directa y además de un bajo costo. De acuerdo a información obtenida SOLARGIS, una empresa dedicada a la evaluación de recursos solares así como al modelado de energía fotovoltaica, México goza de una situación privilegiada en cuanto a irradiación solar, ya que cuenta con zonas que tienen hasta 8.0 kWh/m² por día. Esto nos indica que México tiene una muy buena recepción de energía solar.

Como podemos observar en la Figura 2.3, los kWh/m² al día que hay en nuestro país y las diferencias de tonalidad de color nos muestran las zonas donde hay más irradiación solar.



Figura 2.3: Kilowatts hora por metro cuadrado al día dependiendo el color en el mapa (Solargis, 2019).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en México existe un alto índice de marginación (IM). El IM es una clasificación de la población con base en sus privaciones y carencias en cuanto a educación, vivienda, ingresos y distribución de la población. Lo cual nos brinda un área de oportunidad de aplicación de energías alternas para que las comunidades más necesitadas tengan una fuente de energía sustentable y segura. Como se muestra en la Figura 2.4, algunas de las zonas donde existen carencias de recursos son zonas de alta irradiación solar, en las que se podría aprovechar esta energía alternativa para impulsar un ciclo de refrigeración.

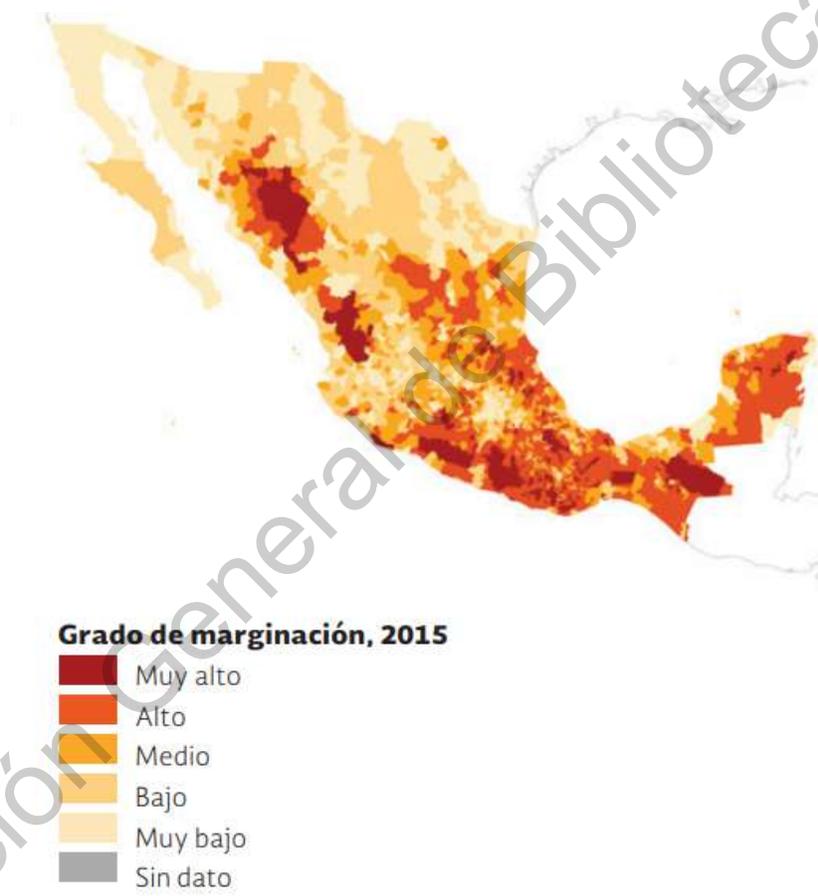


Figura 2.4: Índice de marginación en México (CONAGUA, 2018).

Además el uso del motor tipo PMSM se ha extendido recientemente (Bose, 2006), esto se debe a su uso en diferentes aplicaciones que requieren una respuesta rápida y un alto rendimiento (Zhong et al., 1997), por ejemplo, en aplicaciones de servomotores como máquinas de ensamblaje de chips, discos duros y robótica, ya que tienen un bajo nivel de

ruido, baja inercia, alta eficiencia y bajo costo de mantenimiento (Choi et al., 2010). Para este estudio se usará la topología de tres puentes H, utilizada previamente por Espíndola (2017), para alimentar cada fase del motor. Esto para aprovechar al 100 % el bus de CD que se utiliza. Ya que usando el método de puente trifásico solo se aprovecha un máximo de un 78 % del bus de CD (Alcaide, 2016). Es por todo lo anterior que se eligió este tipo de motor para trabajar con el ciclo de compresión de vapor.

En el presente trabajo se suplirá el compresor del ciclo por un compresor de aire acondicionado automotriz y además se requiere comprobar que acoplando un motor PMSM al compresor del ciclo habrá un ahorro de energía. El compresor del ciclo VCC es uno de los componentes más caros (Choi et al., 2018), se requiere un compresor de bajo costo. El ciclo en este caso será alimentado por un bus de 24V, para no utilizar la CA suministrada por CFE.

III. HIPÓTESIS

Un motor tipo PMSM alimentado por un bus de CD y electrónica de potencia incrementa la eficiencia energética de un refrigerador doméstico por compresión de vapor, al mover el compresor del ciclo de refrigeración.

Dirección General de Bibliotecas UJAQ

IV. OBJETIVOS

IV.1. Objetivo general

Implementar un motor PMSM y un compresor automotriz a un refrigerador doméstico DAEWO FR-142, alimentado por un bus de 24V para aumentar su eficiencia energética.

IV.2. Objetivos específicos

- Medir el tiempo y la energía en kWh que consume el refrigerador al lograr la temperatura deseada de operación en 110V de CA.
- Mover un motor PMSM con un circuito de potencia utilizando tres puentes H y una FPGA modelo Upduino, además de una interfaz en software labview para comunicación serial PC-FPGA y como alternativa de software libre también utilizar DEV C++ para la comunicación serial con el FPGA.
- Aislar la etapa digital (FPGA) de la etapa de potencia mediante optoacopladores ISO7240.
- Alimentar un motor PMSM con una fuente de CD de 24V.
- Acoplar el motor PMSM al compresor.
- Mover el compresor automotriz con el motor PMSM alimentado por 24 VCD.
- Acoplar el PMSM y el compresor automotriz al refrigerador.
- Controlar la temperatura con distintas velocidades del compresor.
- Realizar pruebas de consumo de energía y tiempo de enfriamiento para verificar el aumento de eficiencia utilizando fuente de 24VCD.

V. METODOLOGÍA

V.1. Diagrama de flujo.

La Figura 5.1 muestra el diagrama de flujo del proceso a seguir en la experimentación para lograr demostrar la hipótesis. Se comienza mencionando el acondicionamiento eléctrico del motor, el cuál se realiza obteniendo las seis terminales (dos por cada fase del motor) y conectándolas a tres puentes H. Se utiliza un puente H para cada fase del motor. También en este primer paso se realiza el suministro de 24V de CD para cada fase del motor. Posteriormente se realiza la Programación de la FPGA para la recepción de señales senoidales y envío de PWM. Así mismo también la programación de la interfaz de comunicación serial computadora-FPGA. Se muestra la condición de que si la FPGA recibe las señales via puerto serie entonces podemos continuar al siguiente paso si no, tenemos que regresar al punto de programación de dicho dispositivo y de la interfaz. Si el paso anterior es positivo, entonces continuamos con el giro del motor, ya que la FPGA está enviando los PWM a los puentes H y estos a su vez alimentando cada fase del motor. Se procede a aislar la etapa digital de la de potencia, por seguridad. Si con el aislamiento el motor continúa operando entonces se tiene el nuevo sistema en CD listo y se procede a realizar las mediciones de energía del refrigerador en CA. Por el contrario, se tiene que retroceder al paso del aislamiento y verificar conexiones, modelos de optoacopladores y hacer una revisión general antes de continuar. Cuando las mediciones de energía se encuentren realizadas y la etapa de potencia operando correctamente, se continúa con el acoplamiento del motor y el compresor al refrigerador. Teniendo el sistema acoplado, se procede con las mediciones de energía en CD. Haciendo la comparativa con ambos sistemas en CA y CD, si el consumo de corriente es menor en CD que en CA, entonces la hipótesis resulta ser verdadera y se da fin al procedimiento, en caso contrario, se regresa a acoplar otro motor PMSM y otro compresor automotriz para volver a hacer mediciones y verificar la eficiencia energética con un sistema de este tipo.

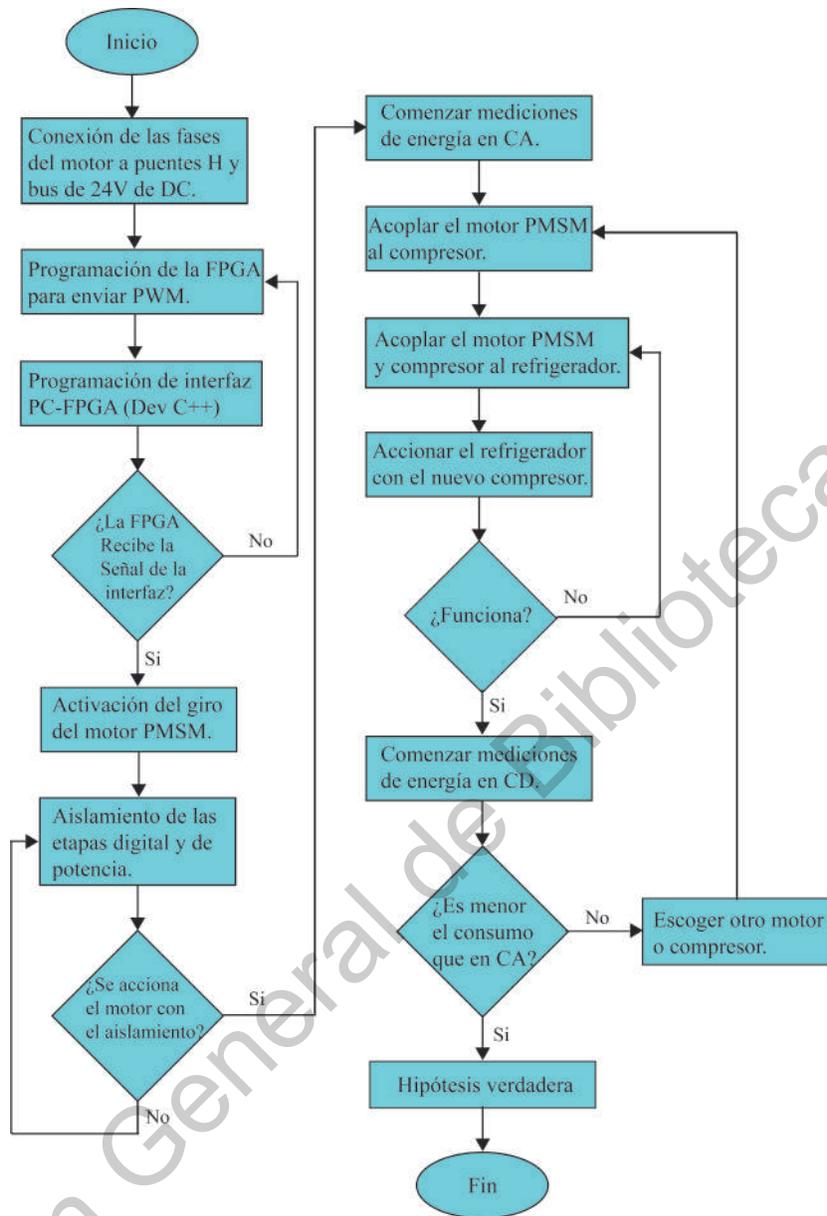


Figura 5.1: Diagrama de flujo de la metodología a seguir en la experimentación.

V.2. Acondicionamiento eléctrico del motor.

Podemos encontrar en la hoja de datos del fabricante algunas características del motor utilizado. En primer lugar, este motor tiene un par nominal de 1.2710 N-m (180 oz-in). El par máximo en este motor es de hasta el 300 % del par nominal, en el caso de la corriente máxima aumenta de la misma manera que el par máximo y el aumento es de hasta el 300 % de la corriente nominal. El valor de la corriente nominal es de 2.7A y la corriente máxima es de 8.1A según las especificaciones. El modelo de motor utilizado es el EMJ-04APB22, la marca es ESTUN y la hoja de datos del motor es proporcionada por Anaheim Automation. Este servomotor viene de fábrica con un encoder incremental de 2500 pulsos por revolución (PPR) y la velocidad máxima que podemos aplicar según el fabricante es de 4500 revoluciones por minuto (RPM) y gestiona una potencia de 400 Watts (Automation, 2015).

Este dispositivo es trifásico y se alimenta originalmente con un voltaje de 200V de CA para este modelo y tiene una resistencia de fase de 4.7 Ohms. Este modelo de motor es cerrado y autoenfriado, esta configuración proporciona una vida útil más larga y una mayor fiabilidad. Debido a las características previamente revisadas y encontradas en las especificaciones del fabricante, este modelo de PMSM es útil en aplicaciones de control de movimiento industrial al lograr la combinación de velocidad y funcionalidad de posicionamiento. La conexión de fábrica de este PMSM es conexión en estrella y se desmonta para obtener las 6 conexiones (dos para cada fase) para poder mover las 3 fases con los puentes H conectados en configuración en estrella.

Se extraen los seis cables del interior del motor para formar la misma conexión estrella de fábrica pero ahora en el exterior. El motor PMSM utilizado es trifásico por lo tanto, son dos cables por cada fase. El motor a utilizar se puede observar en la Figura 5.2.



Figura 5.2: Motor PMSM marca ESTUN con los seis cables de alimentación visibles.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

V.3. Etapa de potencia.

Para el accionamiento del motor se requiere que cada una de las conexiones de sus fases, obtenidas de la conexión en estrella original, esten en cada puente H. Se eligió trabajar con la topología de tres puentes H debido a que en estudios de Alcaide (2016) señalan que al utilizar un puente trifásico para impulsar al PMSM, el bus de CD no se aprovecha al 100 %, si no que tenemos aproximadamente un 78 % del total de voltaje del bus. En este caso los con los puentes H tenemos 24V de salida hacia las fases, reduciendo perdidas. Además se acoplará el PMSM al compresor automotriz para verificar que este lo pueda impulsar. La conexión de los puentes H a las fases de motor se muestra en la Figura 5.3:

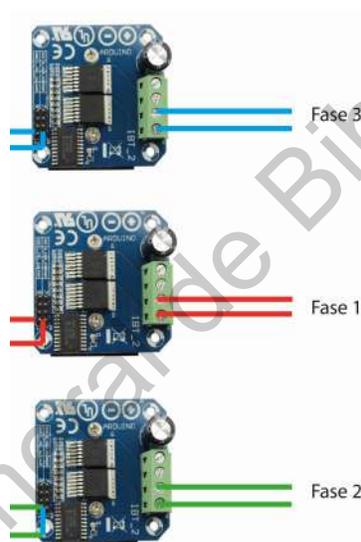


Figura 5.3: Esquema que muestra la conexión que se requiere hacer en los puentes H para accionar el motor.

El módulo a utilizar en este estudio es el modelo IBT-2, que es un controlador de motor basado en dos chips BTS7960. Se eligió debido a los requisitos del motor mencionados anteriormente, uno de ellos es la corriente que el motor necesita para funcionar la cual es de 3.7A, por lo que se utilizó un módulo que tuviera la especificación de corriente correcta o mayor que ésta para un rendimiento adecuado. La corriente máxima de operación que maneja este módulo es de 43A, sin embargo en la hoja de datos del fabricante nos muestra que el motor maneja picos de máximo 8.1A, por lo que no es requerida la máxima capacidad del puente H. Otras especificaciones clave que llevaron a la elección de este dispositivo fueron: voltaje de entrada y nivel lógico de voltaje de entrada, como lo podemos encontrar en Infineon (2004). En el caso de la tensión de entrada nos referimos a la tensión que puede manejar el puente H, en este caso la tensión mínima es de 6V y la máxima de 27V. Para esta experimentación serán necesarios 24V de operación por lo que está dentro de la especificación. Para el nivel de tensión de entrada lógica para la activación del puente H, son necesarios 5V. También para la tarjeta electrónica previamente diseñada se necesita una tensión similar de 5V, por lo que al tener los dos dispositivos con la misma fuente de alimentación no es necesario el uso de una fuente adicional para activarlos.

Las entradas y salidas del puente H se muestran en la Figura 5.4:



Figura 5.4: Puertos de entrada y salida del puente H modelo IBT-2.

Se señala con la letra A, a la entrada GND y con la letra B a la entrada VCC, en este puerto se conectan 5V, que son los necesarios para la activación del puente H. Posteriormente tenemos con las letras C y D las salidas laterales de alarma de corriente, que no fueron utilizadas para este trabajo. Después contamos con dos entradas, indicadas con las letras E y F, que son ENB-R y ENB-L, las cuales requieren ser conectadas a 5V para el activamiento de las señales PWM. Finalmente tenemos las entradas PWM-L y PWM-R, señaladas con G y H, izquierda y derecha respectivamente. Las entradas fueron nombradas por el orden de las letras señaladas en la imagen.

Por otro lado tenemos dos entradas y dos salidas que se muestran a la derecha de la imagen, donde 1 y 2, están simbolizadas como B- y B+, en estas entradas se conecta la fuente de 24V y las salidas 3 y 4 simbolizadas como M+ y M-, es donde se conectarán las fases del motor.

V.4. Etapa digital.

V.4.1 Microcontrolador PIC18F4431

Para la primera parte de las pruebas experimentales de giro del motor se utilizó un microcontrolador PIC18F4431. Este se programó para enviar las señales PWM hacia los puentes H, que a su vez son alimentados con una fuente de 24V. Para enviar estas señales se necesita programar tres salidas, es decir, se utilizarán tres pines del microcontrolador. Para traducir las señales a PWM, este dispositivo necesita recibir por medio de puerto serie tres señales senoidales enviadas desde el software Dev C++. Sin embargo, para activar los puentes H es necesario enviar seis señales PWM, por lo que se agrega un circuito lógico entre las salidas del PIC y los puentes H. Este circuito es conformado por tres compuertas lógicas tipo AND modelo SN74HC08. Se utilizan tres para usar cada una para un PWM. El diagrama mostrado en la Figura 5.5 nos señala la conexión del circuito lógico para dos salidas para un puente H.

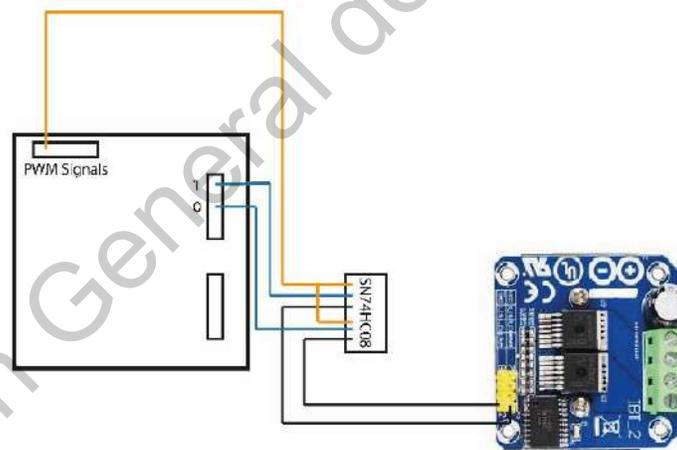


Figura 5.5: Diagrama de conexión del circuito lógico para un solo puente H.

En la Figura 5.5 también se muestran dos salidas más del PIC las cuales es necesario programar como un 1 y un 0 lógicos. Dos entradas de la puerta son para el PWM1, así mismo las siguientes entradas son para el 1 lógico y el 0 lógico también enviado desde el PIC, haciendo estas conexiones si tenemos un PWM en 1 y la salida lógica del PIC en 1, haciendo la operación lógica de la compuerta AND obtenemos 1 en la salida, así mismo en el caso de

tener un PWM en 1 pero la salida del PIC está en 0 obtenemos un 0 a la salida de la puerta, obteniendo un PWM y su complemento. Obsérvese que la conexión mostrada es sólo para un puente H, el motor utilizado en este trabajo es trifásico como ya se ha mencionado, por lo que es necesario realizar las conexiones de los PWM restantes para completar los tres puentes H de las tres fases del motor. Para realizar el programa de envío de señales se utiliza el software PIC C Compiler y para cargar el archivo generado por dicho software al microcontrolador utilizamos la tarjeta programadora para PIC Master-prog y el software con el mismo nombre para cargar el archivo .hex generado por el PIC-C compiler al microcontrolador.

V.4.2 FPGA modelo Upduino 2.0

La FPGA, que se utilizará en el sistema que moverá el motor del compresor del refrigerador se muestra en la Figura 5.6 :

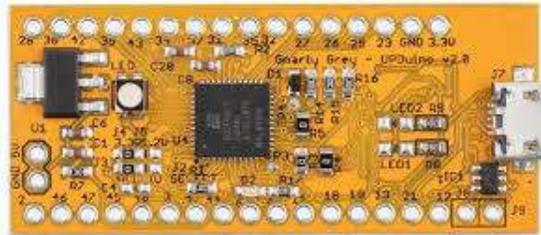


Figura 5.6: FPGA modelo Upduino 2.0.

Se requieren enviar seis señales PWM desde esta FPGA hacia los puentes H, que serán los encargados de accionar cada fase del motor. Para lo cual se cuenta con seis pines de salida de dicha FPGA, los utilizados fueron los numerados con 25, 26, 27, 32, 35 y 31. El voltaje de funcionamiento de este dispositivo es de 5V y su entrada de alimentación es del tipo microUSB con salida USB, por lo que será conectada a la PC para su funcionamiento. Así mismo requiere de la comunicación por alguno de sus pines con la PC, por lo cual se utilizará un conector tipo FTDI para el enlace de la FPGA con la computadora. Cuenta con un LED indicador de encendido y 34 pines físicos por lo que aún utilizando seis de ellos como señales PWM tenemos un amplio margen para utilizar los pines restantes en otras aplicaciones si así lo requiriera la experimentación. El chip con el que cuenta esta FPGA es iCE40 UltraPlus FPGA. El software libre Diamond programmer se utiliza para programar este dispositivo. Éste se descarga sin costo desde la página del fabricante *LATTICE SEMICONDUCTOR*. Para cargar el archivo del programa de envío de PWM tenemos que abrir el software Diamond y en la primer ventana que nos aparece seleccionar el comando *blank project* como si fuéramos a crear un proyecto nuevo. Posteriormente en la pantalla principal seleccionamos la familia del dispositivo a programar, en este caso *ice40ultraplus*. En dispositivo a programar seleccionamos el modelo *ICE40UP5K*. Después en la sección de operación seleccionamos programar y cargamos el archivo .hex generado al crear el programa de envío de señales, no sin antes seleccionar el modo de acceso el cual es *SPI flash programming*. Con el procedi-

miento anterior queda grabado el programa en la FPGA. Cabe señalar que no necesita una conexión extra para ser programada. El programa se transfiere por puerto serie por la entrada microUSB, la misma usada para su alimentación.

Para seguridad del circuito y de la FPGA se requiere aislar esta etapa de la etapa de potencia utilizando optoacopladores, los cuales se describen en secciones posteriores. De igual manera para hacer más compacto el circuito, se diseña una tarjeta electrónica de circuito impreso (PCB) con ayuda del software Altium Designer. Este software cuenta con una licencia de libre uso para estudiantes, con una duración de 6 meses, además de contar con herramientas de diseño de circuitos impresos e incluso con software en diversas versiones. Con esta herramienta de diseño además se pueden crear nuevos componentes electrónicos que no incluya el software de fábrica, por ejemplo ésta FPGA. Fué necesario crear una nueva librería que tuviera el componente para que al fabricar la tarjeta no hubiera problema en cuestión del número de pines de la FPGA y el componente pudiera embonar y soldarse al PCB.

V.5. Interfaz en software LABVIEW y DEV C++.

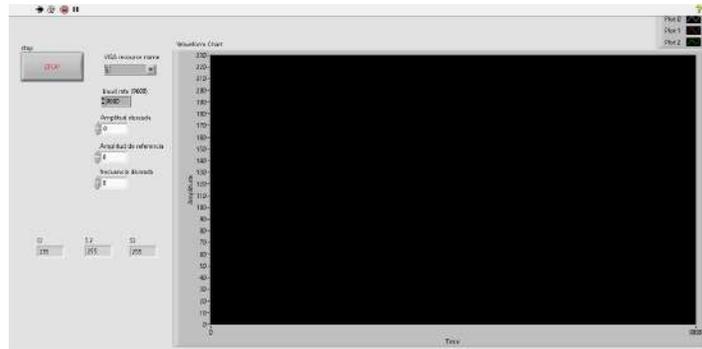


Figura 5.7: Interfaz de comunicación serial entre la PC y la FPGA utilizando software LABVIEW.

La interfaz mostrada en la Figura 5.7 se compone de un recuadro que nos muestra la velocidad de transmisión de datos, la cual se configurará a 9600 baudios, misma velocidad que se configura en la FPGA para que no haya problema en la recepción de los datos. También un recuadro que muestre por que puerto serie estamos transmitiendo los datos, llamado en este caso *VISA resource name*. La amplitud deseada será la amplitud de la señal que se requiere enviar de la PC a la FPGA y la amplitud de referencia es la señal de voltaje que estamos manejando para alimentar cada fase del motor. Tenemos otro recuadro para la configuración de la frecuencia deseada, que es la frecuencia de la señal que llega a los puentes H y con la que el motor adquiere movimiento. Se requiere de un botón de paro (stop) en la interfaz, además de mostrar en la pantalla las ondas senoidales que se envían a la FPGA, desfasadas cada una 120° , 0° y -120° . Con esto se pretende modificar la frecuencia deseada en caso de ser necesario, además de enviar mediante puerto serie las señales senoidales a la FPGA que es la encargada de generar las señales PWM para enviarlas a los puentes H. Como una alternativa de software libre, también se hará uso de DEV C++, en el que se generó un código el cual envía mediante puerto serie las señales senoidales desfasadas necesarias para que la FPGA las reciba y genere también las señales PWM.

V.6. Optoacoplamiento.

Para la seguridad, en caso de sobretensión y para blindar el paso del ruido de la parte de potencia a la electrónica de control, se realizará como medida de protección el optoacoplamiento entre la FPGA y la etapa de potencia que en este caso son los puentes H. El modelo de optoacopladores a utilizar es 4N25 y el circuito de conexión de los optoacopladores se muestra en la Figura 5.8

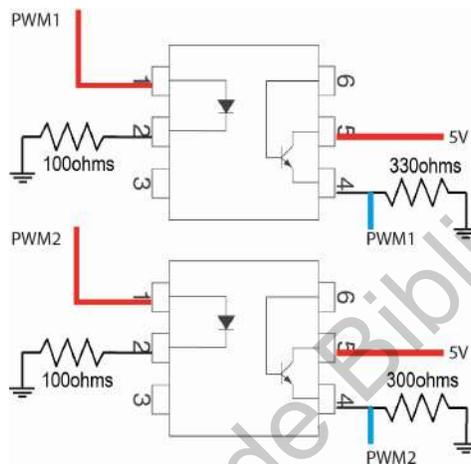


Figura 5.8: Diagrama que muestra la conexión de dos señales PWM con los optoacopladores 4N25.

Como se observa el diagrama muestra dos de los seis PWM, sin embargo la conexión para los cuatro restantes es la misma. Cada par de señales van conectadas a los PWM de los puentes H mencionados anteriormente. El optoacoplador trabaja a una frecuencia de señal de entrada de máximo 10kHz y con un voltaje de señal de hasta 5V. La siguiente imagen muestra el circuito de conexión completo, con la conexión de los pines de la FPGA, los cuales cumplen con la función de señal PWM, para posteriormente, mostrar la conexión completa de los seis optoacopladores correspondientes a cada una de las señales PWM. En la etapa de potencia de la Figura 5.9 se muestran los dos integrados BTS 7960 que contiene el puente H modelo IBT-2, en los cuales la conexión de las señales PWM viene señalada como IN, el voltaje de 24V es con el que se alimentarán cada una de las fases del motor y la salida simbolizada con la letra M, es la conexión de cada fase del motor. La entrada INH es la activación del puente H, sin el voltaje suministrado el puente H no se activará.

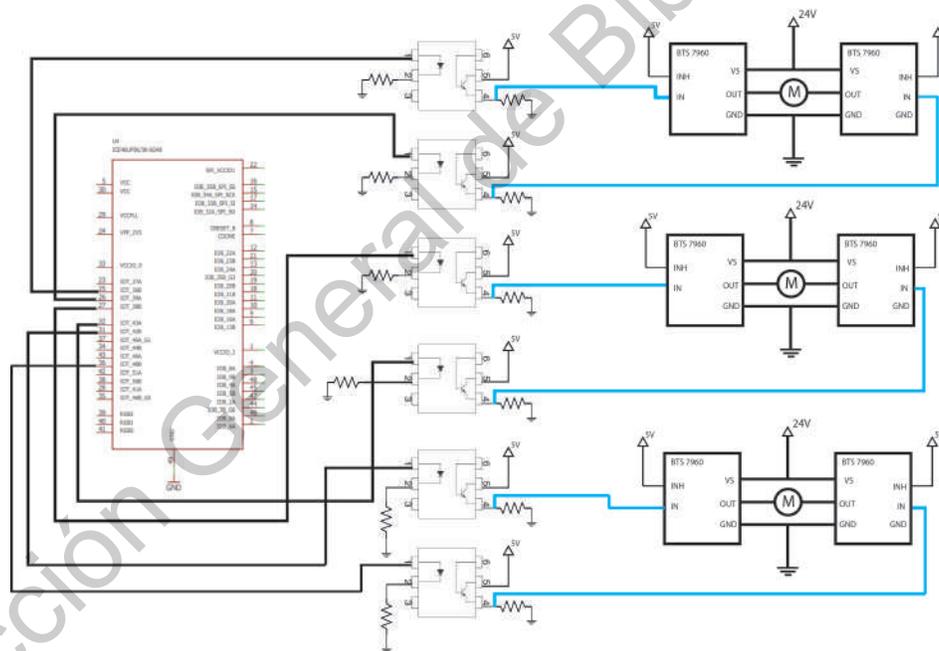


Figura 5.9: Diagrama que muestra la FPGA optoacoplada con los puentes H IBT2.

V.7. Medición de energía consumida.



Figura 5.10: Refrigerador marca DAEWOO modelo FR-142 utilizado como prototipo experimental.

Se medirá la energía consumida del refrigerador Daewoo modelo FR-142 mostrado en la Figura 5.10. Según el manual de servicio del fabricante, éste refrigerador cuenta con un consumo anual de 237 kWh. Cuenta con un sistema de descongelación natural y capacidad de 122L. Puede funcionar además con dos tipos de refrigerantes, el R12 y el R134a. El primero de ellos se le debe agregar en una cantidad de 115g y el segundo solamente 105g.

Este aparato puede definirse como refrigerador solo según la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2018, de eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos, límites, métodos de prueba y etiquetado. Ya que cuenta con un compartimiento de alimentos e incluye un compartimiento congelador incorporado, que mantiene temperaturas inferiores a 0°C . También puede llamarse refrigerador compacto por tener un volumen total menor que 220 L y menor a 0.91 m. Además puede clasificarse como Clase II por el hecho de contar con un compartimiento congelador incorporado capaz de mantener temperaturas entre 0 y -9.4°C . La Norma Oficial Mexicana mencionada anteriormente fija los límites máximos de consumo de energía de los refrigeradores y congeladores de uso doméstico operados por motocompresor hermético, establece los métodos de prueba para determinar dicho consumo de energía y calcular el volumen total refrigerado y especifica la etiqueta de consu-

mo de energía y su contenido.

También dicha norma establece que la cantidad máxima de energía consumida por un refrigerador del tipo al que pertenece el FR-142 es de 225 kWh anuales, por lo que actualmente un refrigerador como con el que contamos no cumple el límite establecido de consumo. En este caso sería ideal que al medir la energía con el sistema propuesto en este trabajo, en CD, el consumo fuera menor.

Por otro lado, desde el punto de vista teórico podemos definir para el contenido de armónicos de voltaje V_s y corrientes I_s , los valores efectivos de voltaje y corriente RMS como (Trejo-Perea et al., 2011):

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{S=0}^N V_S^2} \quad (5.1)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{S=0}^N I_S^2} \quad (5.2)$$

Por lo tanto la potencia activada se calcula de la siguiente manera:

$$W = \sum_{S=0}^N V_S I_S \cos(\Phi_S) \quad (5.3)$$

Donde Φ_S = el ángulo de fase para la excitación sinusoidal de la S -ésima frecuencia armónica.

El cálculo para la frecuencia aparente es:

$$VA = V_{RMS} I_{RMS} = \sqrt{\sum_{S=0}^N V_S^2} \sqrt{\sum_{S=0}^N I_S^2} \quad (5.4)$$

Además del refrigerador descrito en la Figura 5.10 se necesita del analizador de energía mostrado en la Figura 5.13, el cual será utilizado para la medición de kWh consumidos por el refrigerador en un intervalo de tiempo. Este intervalo de tiempo será medido desde que el refrigerador comienza con el enfriamiento hasta que alcanza su temperatura más baja y se apaga.

La temperatura será medida con el termómetro infrarrojo digital mostrado en la Figura 5.12 y el termómetro bimetálico mostrado en la Figura 5.11, para verificar con los dos dispositivos que la medición sea correcta.



Figura 5.11: Termómetro bimetálico marca ibili, modelo 743401.



Figura 5.12: Termómetro láser infrarrojo marca FLUKE modelo 62 Max.

El analizador de energía utilizado para esta primera actividad es el FLUKE modelo 435 y para la medición del tiempo se utiliza un cronómetro tradicional.



Figura 5.13: Analizador de energía FLUKE 435 utilizado en la experimentación midiendo los kWh consumidos en CA.

La metodología utilizada para la medición de la temperatura es: como primer paso, abrir la puerta del refrigerador y con el termómetro y el termopar medir la temperatura, hasta que esta sea temperatura de 25 o 26°C . Enseguida se cierra la puerta y comienza la prueba, tanto de temperatura con ambos dispositivos y la medición de la energía con el analizador FLUKE 435. Como intervalo de tiempo se toman de 15 a 20 minutos, en los que el refrigerador puede alcanzar temperaturas de 9°C hasta 5°C , lo cual se considera como valor ideal para conservar alimentos dentro de este. Para finalizar la prueba, cuando la temperatura se mantiene en esas cantidades se toma la medida de la energía consumida, el tiempo y la temperatura que se alcanzó, esta primera prueba se toma como base para las posteriores, en comparación con que en las pruebas siguientes se toma el mismo tiempo desde el arranque del refrigerador hasta que logra su temperatura deseada, para así volver a medir el consumo de energía en ese mismo intervalo de tiempo, repitiendo el primer paso de poner el refrigerador en una temperatura ambiente.

Cabe señalar que para la medición de energía utilizamos un instrumento que no está al alcance de todos económicamente hablando, ya que sus precios oscilan entre los \$100,000.00 y \$300,000.00 MXN según la página del fabricante. Por lo que una alternativa para la medición de la energía en esta experimentación son los wathorímetros mostrados en la Figura 5.14 marca COIL CT modelos 061 y 022 para medir CA y CD respectivamente. Para comprobar que son instrumentos confiables se compararán más adelante sus lecturas con las del analizador de energía marca FLUKE para verificar que sus mediciones son precisas.



Figura 5.14: Wathhorímetros utilizados como una alternativa económica para la medición de energía.

En caso de que las mediciones resultaran favorables y hubiera un consumo bajo de energía, tendríamos que validar todo el proceso descrito en este trabajo con el Apéndice A de la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2018, de eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos, límites, métodos de prueba y etiquetado. El cual es el método de prueba uniforme para la medición del consumo de energía de los refrigeradores, refrigeradores-congeladores y otros aparatos de refrigeración. Éste describe una serie de pasos a seguir, instrumentos a utilizar, variables a medir y condiciones ambientales a seguir para realizar la validación del consumo de energía. Después de seguir dicho método se tienen que comparar los resultados con la tabla de consumos máximos de energía por año y modelo de refrigerador descrita en la NOM-015-ENER-2018.

V.8. Acoplamiento mecánico del compresor y el PMSM al refrigerador.



Figura 5.15: Compresor automotriz marca DENSO.

El compresor a utilizar es el presentado en la Figura 5.15 de la marca DENSO, el modelo es el 047200. Según el fabricante, este compresor utiliza aceite para refrigeración del tipo ND-OIL 6 y gas refrigerante del tipo R12 o tipo R134a (Autoparts, 2020). Además trabaja a un máximo de 426.7 libras por pulgada cuadrada (psi). Se acoplará el nuevo sistema del compresor y el motor PMSM al refrigerador Daewo para las posteriores pruebas en CD. En el proceso se utilizarán los siguientes materiales mostrados en la siguiente Tabla 5.1:

Tabla 5.1: Lista de materiales.

Nombre	Cantidad
Válvula De Servicio C/pivote De 1/4 Tubo X 1/4 F	5 piezas
Tubo De Cobre Flexible 3/8	3 metros
Soldadura Refrigeración Harris	1kg
Tee Union 3/8 Para Gas	4 piezas
Gas refrigerante R-134a	1kg
Cartucho de gas butano/propano	1 pieza
Soplete	1 pieza
Tanque de gas	1 pieza
Avellanador	1 pieza
Cortador de tubo de cobre	1 pieza
Tuercas cónicas	17 piezas
Manómetros	2 piezas
Bomba de vacío	1 pieza
Válvula de paso	3 piezas

Para este paso también se requiere el uso de dos instrumentos, la bomba de vacío (Figura 5.16) y los manómetro (Figura 5.17) que son necesarios para la carga de refrigerante para posteriormente acoplar el compresor automotriz al refrigerador.



Figura 5.16: Bomba de vacío a utilizar para el cambio de refrigerante.



Figura 5.17: Manómetros marca STARK utilizados para la medición de presión del sistema.

Para la carga de refrigerante a un compresor de refrigeración se siguen los siguientes pasos:

1. Cada compresor tiene un conector por donde cargarle el refrigerante requerido, comúnmente llamado válvula de servicio. En algunos casos no cuentan con dicho componente, solo cuentan con el tubo de servicio, el cual como primer paso debemos cortar e instalar un racor con su respectivo abocardado para conectar el manómetro. En caso de que el compresor cuente con la válvula de servicio, solo se debe abrir.
2. Se procede a conectar la manguera azul, la cual es la manguera de baja presión, al manómetro y a la válvula de servicio del compresor. La manguera amarilla se conecta al manómetro y a la válvula de servicio del tanque de refrigerante. La manguera roja se conecta a la bomba de vacío.
3. Se abren las válvulas de alta y baja presión del juego de manómetros y se enciende la bomba de vacío. Se deja encendida hasta que la presión de vacío sea inferior a 30 milímetros de mercurio (mmHg). Si al cerrar la válvula de baja y la aguja sube, quiere decir que aún hay gases en el sistema. En este caso se debe continuar con el procedimiento hasta no haya gases. Si la aguja permanece en su posición inicial se debe cerrar la válvula de alta, apagar la bomba de vacío y desconectar la manguera de la bomba. Se debe esperar un tiempo de 10 a 15 minutos para continuar con la carga de refrigerante.
4. Para continuar con la carga de refrigerante, sin apretar la manguera amarilla se suelta un poco del refrigerante con el fin de que este saque el aire que ha entrado en la manguera. Se aprieta la manguera en la válvula de servicio del tanque de refrigerante y también se libera un poco del mismo. Para la carga se abre la válvula del manómetro de baja. Se abre y cierra permitiendo que, entre paulatinamente refrigerante al sistema, hasta completar la carga del mismo, de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Es recomendable contar con una báscula para verificar que se está suministrando el refrigerante requerido.
5. En caso de no contar con manual de fabricante y no conocer las especificaciones, se observa el evaporador y en la parte donde termina, cuando forma escarcha en esta parte

es cuando la carga de refrigerante ha sido suficiente. Para finalizar el procedimiento cierre la llave de servicio del compresor o aplaste el tubo, córtelo y sárdelo, según sea el caso.

La Figura 5.18 muestra como se deben de conectar los dispositivos previamente mencionados para realizar la carga de refrigerante al compresor de refrigeración.

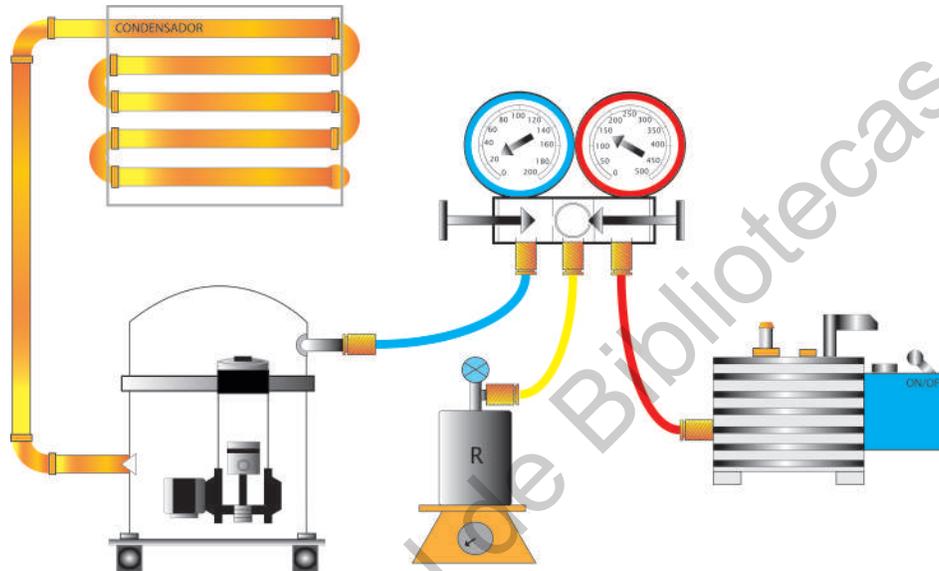


Figura 5.18: Conexiones entre los manómetros, la bomba de vacío y el compresor.

V.9. Compresor tipo York y motor PMSM de 1.8kW.

En esta sección se describen dos componentes extras que se tienen como opción en caso de que el sistema anterior, con el compresor DENSO y el motor PMSM marca ESTUN, no resulte con una eficiencia energética mayor.



Figura 5.19: Compresor de aire acondicionado automotriz modelo York.

El compresor de la Figura 5.19 es un modelo York. Los compresores de aire acondicionado automotriz (CAA) como el York se diferencian entre ellos fundamentalmente por los siguientes elementos: conectores al circuito, sensores y cargadores, electroembrague, el sistema de sujeción, la marca y el modelo. Existen dos tipos de CAA los cuales son: de pistones y de paletas. El modelo York cuenta con un sistema de pistones de movimiento perpendicular al eje. Para la correcta identificación de un compresor se deben definir una serie de aspectos elementales: marca y modelo, sistema de sujeción al vehículo, conectores al circuito de refrigeración. Otros elementos, como sensores y cargadores, el electroembrague, tipo de refrigerante que utiliza (que son los más comunes R-12 y R-134a) y tipo de aceite que se requiere dependiendo el refrigerante que se le aplica. Es necesario conocer todos estos aspectos para identificar inequívocamente el tipo de compresor, ya que definen cómo se adapta al tipo de instalación del equipo de aire acondicionado ó climatizador del vehículo (Lizarte, 2011). En caso de hacer pruebas con dicho compresor es necesario conocer varios de estos aspectos.

También debemos de conocer de estos compresores el tipo de anclaje que tienen ya que también los compresores se clasifican por el tipo y el número de anclajes de sujeción que tengan. Esto para que el compresor pueda ser fijado a una superficie. El número de anclajes puede oscilar entre 2 y 8 enganches. Los tipos de anclajes son : de orejas (ORE), roscadas (CR), sin rosca (SR) y de orejetas.

Los CAA disponen de dos racores de acceso: el de aspiración o succión de gas refrigerante, que siempre es identificado con las letras S ó SUC (del inglés *suction*) y el de descarga, que siempre es identificado con las letras D ó DIS (del inglés *discharge*). El de succión es siempre igual o de mayor sección que el de descarga (Lizarte, 2011). El modelo York cuenta con racor de rosca y tórica ó racores de succión y descarga con rosca, también llamados unión rotalock-R. Por lo que en caso de acoplar este motor al sistema de refrigeración del aparato utilizado tendríamos que adquirir los conectores del tipo de rosca requerida.

Por otro lado, el motor PMSM a utilizar es el expuesto en la Figura 5.20:



Figura 5.20: Motor PMSM de 1.8kW.

El modelo de este dispositivo es 110ST-M06030. Cuenta con una potencia de 1.8kW lo que equivale a 2.4 caballos de fuerza (HP), a diferencia del motor ESTUN de la Figura 5.2 que cuenta con una potencia de 400W que son 0.5 HP. Estaríamos implementando un sistema con un motor que cuenta con una potencia casi cinco veces mayor. Este modelo tiene que ser alimentado por 220V de CA, por lo que cuenta con su propio controlador (driver) de voltaje y velocidad. Maneja una corriente de 6A de funcionamiento continuo. Maneja también una velocidad de 3000 rpm y un torque de 6 N-m, como torque máximo maneja

18N-m. Para el acoplamiento del PMSM con el compresor York será necesario retirar la polea del eje, para que este quede libre y poder unirlo a mediante un cople mecánico a la flecha del motor para que así cumpla el propósito de la polea que es mover el pistón. Una vez hecho este procedimiento se requieren los conectores tipo rotalock-R para soldar las tuberías del refrigerador y acoplar este nuevo sistema.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.1. Primeras mediciones en corriente alterna.

Para el presente trabajo se utilizó un refrigerador marca DAEWO, siendo el modelo FR-142. Como características generales el refrigerador cuenta con dos compartimientos, el de refrigeración y el congelador, cuenta también con un compresor marca Danfoss. Este frigorífico es de 122L y su peso es de 26kg. Sus dimensiones son de 85.8×48×53.1cm. Su nivel de ruido es de 42dB y su consumo anual es 237 kWh/año. Todos estos datos son encontrados en el manual del fabricante del modelo presentado (Daewoo, 2010). Es importante mencionar que al realizar las pruebas de consumo de energía y temperatura deseada se requirieron un analizador de energía FLUKE 435 y de un termómetro y un termopar, ambos para verificar la veracidad de la medición, se buscó que la temperatura obtenida en ambos variara a lo máximo 2°C.

Como metodología para obtener las mediciones de temperatura y consumo de energía se inició con desconectar el refrigerador y dejarlo sin funcionamiento para posteriormente abrir la puerta de este y que se igualara la temperatura a la del ambiente, la cual se midió con los dos instrumentos mencionados anteriormente y oscilaba entre los 23°C y 25°C en ese momento. Se tomó como referencia T1 y T2 las cuales indicaban la temperatura medida por el termómetro y el termopar respectivamente. Se verificó que la temperatura dentro del refrigerador fuera la misma que la temperatura ambiente y se procedió a cerrar la puerta para que dentro de el se quedaran el termopar y el termómetro para iniciar el encendido y empezar la medición del tiempo de descenso de la temperatura y del consumo de energía realizado.

Los resultados de la experimentación se señala en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Resultados de la primera prueba con el FR-142 alimentado con CA.

Experimento	Termopar	Termómetro	Energía
			A=0.79A
11:19am-	T1= 22.5°C	T1= 22.6°C	kWh= 0.03
11:49am	T2= 9.3°C	T2= 8.7°C	kVAh=0.041
			kVARh=0.024
			A=0.78A
11:53am	T1= 23.3°C	T1= 24°C	kWh= 0.019
-12:10pm	T2= 9.2°C	T2= 9.2°C	kVAh=0.026
			kVARh=0.017
			A=0.74A
12:12pm	T1= 23.3°C	T1= 23.1°C	kWh= 0.03
-12:24pm	T2= 9°C	T2= 7.3°C	kVAh=0.018
			kVARh=0.012
			A=0.70A
12:35pm	T1= 24.8°C	T1= 24.3°C	kWh= 0.029
-1:02pm	T2= 7.2°C	T2= 5.6°C	kVAh=0.037
			kVARh=0.026
			A=0.74A
1:09pm	T1= 23.2°C	T1= 23.1°C	kWh= 0.025
-1:32pm	T2= 7.4°C	T2= 6.6°C	kVAh=0.033
			kVARh=0.022
			A=0.73A
1:37pm	T1= 23.4°C	T1= 23.4°C	kWh= 0.026
-2:00pm	T2= 7.2°C	T2= 6.9°C	kVAh=0.033
			kVARh=0.021

Para los siguientes ensayos, mostrados en la Tabla 6.2, se siguió utilizando el FLUKE 435 para la medición de energía consumida. Aunque las siguientes pruebas se realizaron durante la tarde, se cuidó mantener la temperatura de la habitación lo más cercana a la temperatura ambiente, esto para que no hubiera alguna afectación en el desempeño del refrigerador y las mediciones resultaran en valores cercanos. Podemos observar que además de mostrarnos los kWh que consume el refrigerador en CA, también nos muestra otros parámetros como la corriente que consume el refrigerador por mencionar un ejemplo.

Para probar el consumo de energía, los parámetros más importantes son W y kWh. Los W miden el uso instantáneo (cuanta electricidad un aparato está usando), mientras que los kWh, que es la unidad de medida de la potencia activa, dan la medida del uso de electricidad a través del tiempo. Por ejemplo, un calefactor eléctrico de 1,000W funcionando por una hora usará un kWh de electricidad (Weiner y Shonle, 2011). En el caso de los kVAh es la cantidad total de potencia que consume un equipo eléctrico. Es la potencia total que requieren los equipos inductivos o no lineales para trabajar, esta compuesta por los kWh y es mayor que estos últimos, comúnmente la requieren los Motores, computadores, neveras, televisores y electrónica (Aplicada, 2020). Para relacionar estas dos potencias se utiliza la siguiente ecuación:

$$kVAh = \sqrt{(kWh)^2 + (kVARh)^2} \quad (6.1)$$

En la Ecuación 6.1 podemos ver el uso del parámetro kVARh que es la potencia que requieren algunos equipos para generar su campo eléctrico. Para diferenciar kVAh de kWh, debemos comprender que en el caso de kVAh se nombra potencia aparente porque es la cantidad de potencia que consume un dispositivo, pero es aparente porque no toda se utiliza para generar un trabajo. En cambio, los kWh son la potencia que se convierte en una salida útil y que realmente genera un trabajo.

En la Tabla 6.3 se muestran los resultados de la medición de energía del segundo ensayo, usando el watthorímetro COIL CT 061 además del FLUKE 435. Los dos se conectaron a las terminales de CA del refrigerador de manera que midieran el consumo de energía al mismo tiempo. El watthorímetro sólo nos muestra la medición de la corriente consumida por el refrigerador y de la potencia activa.

Tabla 6.2: Resultados de la segunda prueba con el FR-142 alimentado con CA.

Experimento	Termómetro láser	Termómetro bimetálico	Energía
			A= 0.8
12:53 pm-	T1= 25°C	T1= 24°C	kWh = 0.059
1:40 pm	T2= 5 °C	T2= 3°C	kVAh=0.089
			kVARh=0.066
			A= 0.78
1:55 pm-	T1= 24.6 °C	T1= 23°C	kWh = 0.036
2:30 pm	T2= 6 °C	T2= 5 °C	kVAh=0.069
			kVARh=0.055
			A= 0.8
2:40 pm -	T1= 23°C	T1= 23 °C	kWh = 0.043
3:10 pm	T2= 6 °C	T2= 4°C	kVAh=0.066
			kVARh=0.099
			A= 0.79
3:30 pm-	T1= 25°C	T1= 24°C	kWh = 0.047
4:05 pm	T2= 3 °C	T2= 4°C	kVAh=0.073
			kVARh=0.095
			A= 0.80
4:17 pm-	T1= 25°C	T1= 23°C	kWh = 0.067
5:12 pm	T2= 2°C	T2= 1°C	kVAh=0.100
			kVARh=0.074
			A= 0.79
6:15 pm-	T1= 22.6 °C	T1=22 °C	kWh = 0.047
6:56 pm	T2= 4 °C	T2= 3°C	kVAh=0.072
			kVARh=0.055

Tabla 6.3: Resultados de la segunda prueba pero midiendo la energía con el wathhorímetro COIL CT 061.

Experimento	Termómetro láser	Termómetro bimetalico	Energía
12:53 pm-	T1= 25°C	T1= 24°C	Wh = 59
1:40 pm	T2= 5 °C	T2= 3°C	
1:55 pm-	T1= 24.6 °C	T1= 23°C	Wh = 40
2:30 pm	T2= 6 °C	T2= 5 °C	
2:40 pm -	T1= 23°C	T1= 23 °C	Wh = 43
3:10 pm	T2= 6 °C	T2= 4°C	
3:30 pm-	T1= 25°C	T1= 24°C	Wh = 50
4:05 pm	T2= 3 °C	T2= 4°C	
4:17 pm-	T1= 25°C	T1= 23°C	Wh = 70
5:12 pm	T2= 2°C	T2= 1°C	
6:15 pm-	T1= 22.6 °C	T1=22 °C	Wh = 47
6:56 pm	T2= 4 °C	T2= 3°C	

Como se puede observar en los resultados de medición de energía, con el analizador marca FLUKE la energía estaba dada en kWh, a diferencia del wathhorímetro que nos mostró la medición en Wh. Observando las tablas anteriores podemos observar que las medidas mostradas por el wathhorímetro coinciden con las del analizador de energía, por lo que se puede decir que el wathhorímetro es confiable.

VI.2. Acoplamiento del motor al compresor automotriz.

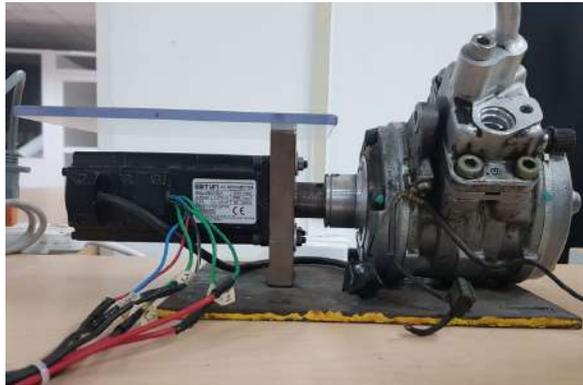


Figura 6.1: Acoplamiento del PMSM a un compresor de aire acondicionado automotriz.

Como resultado del acoplamiento tenemos la Figura 6.1, donde se observa que el PMSM está acoplado al compresor automotriz, ambos están montados en una base de metal. Al motor PMSM fue atornillada otra base, se le insertaron cuatro tornillos y fue necesario el uso de llave allen para ajustarla a dicha base. A la siguiente base se le agregó una plataforma pequeña de acrílico en la parte posterior por si es necesario montar el circuito ahí y que el diseño quede compacto. Al motor PMSM se le desmontó la conexión de estrella que contiene de fábrica para lograr extraer los seis cables de la conexión, dos por cada fase. Por último para su buen desempeño, al compresor se le agregó aceite sintético para refrigeración sw-68.

VI.3. Interfaz en Labview y DEV C++.

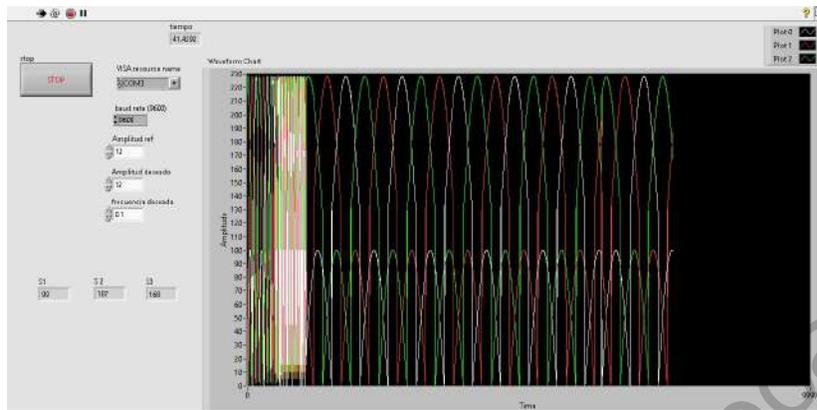


Figura 6.2: Resultados de la interfaz en funcionamiento.

Como resultado se obtuvo la interfaz indicada en la Figura 6.2, algunas de las características que observamos en la interfaz es el tiempo transcurrido en la prueba de la imagen anterior, el cual nos muestra un tiempo de 41.42 segundos. El puerto serie donde se comunica la interfaz con la FPGA es el COM3. Se eligió para este ensayo una frecuencia de 0.1 Hz para poder apreciar en la pantalla los cambios en las ondas senoidales generadas. La amplitud de señal de referencia PWM se eligió en 12V, en el primer ensayo, ya que se utilizaron 12 volts. Si se requiere más voltaje a la salida, se tiene que elegir una amplitud de señal mayor. Se observa también el botón de paro en caso de algún inconveniente con la experimentación y por último del lado inferior izquierdo se muestran los grados de desfase de las ondas senoidales mostradas en pantalla.

La interfaz fue comunicada vía puerto serie a la FPGA la cual contiene el código de recepción y envío de las señales PWM.

De igual manera en el software DEV C++ se obtuvo una interfaz como se muestra en la Figura 6.3. En donde se señala en la primera columna de izquierda a derecha un tiempo transcurrido de 569 segundos y posteriormente se muestran tres columnas, con valores diferentes de cero, las cuales indican el envío de datos a la FPGA los cuales son las tres ondas senoidales desfasadas. De igual manera se configuró en el programa una señal de referencia de 12V para comenzar las pruebas, sin embargo en ensayos posteriores se configuró a 24V para aumentar el voltaje que se aplicó al motor para su accionamiento cuando es acoplado al compresor.

```

C:\Users\MarcoGomez\Desktop\Prueba modificada\Codigo en C Motor.exe
569.584 0.000 0.000 2.073 -5.917 3.860 0.000 30.120
569.594 0.000 0.000 0.307 -5.355 5.050 0.000 30.120
569.604 0.000 0.000 -1.486 -4.310 5.784 0.000 30.120
569.615 0.000 0.000 -3.145 -2.875 5.977 0.000 30.120
569.625 0.000 0.000 -4.521 -1.182 5.668 0.000 30.120
569.635 0.000 0.000 -5.488 0.618 4.828 0.000 30.120
569.645 0.000 0.000 -5.961 2.362 3.553 0.000 30.120
569.655 0.000 0.000 -5.895 3.894 1.957 0.000 30.120
569.665 0.000 0.000 -5.298 5.074 0.184 0.000 30.120
569.675 0.000 0.000 -4.223 5.796 -1.605 0.000 30.120
569.685 0.000 0.000 -2.767 5.995 -3.249 0.000 30.120
569.695 0.000 0.000 -1.061 5.654 -4.600 0.000 30.120
569.705 0.000 0.000 0.740 4.802 -5.537 0.000 30.120
569.715 0.000 0.000 2.475 3.518 -5.973 0.000 30.120
569.725 0.000 0.000 3.986 1.916 -5.871 0.000 30.120
569.735 0.000 0.000 5.138 0.141 -5.240 0.000 30.120
569.745 0.000 0.000 5.026 -1.647 -4.135 0.000 30.120
569.755 0.000 0.000 5.989 -3.286 -2.658 0.000 30.120
569.765 0.000 0.000 5.612 -4.628 -0.940 0.000 30.120
569.775 0.000 0.000 4.728 -5.553 0.862 0.000 30.120
569.785 0.000 0.000 3.417 -5.977 2.586 0.000 30.120
569.795 0.000 0.000 1.799 -5.862 4.077 0.000 30.120
569.805 0.000 0.000 0.018 -5.218 5.200 0.000 30.120
569.815 0.000 0.000 -1.764 -4.103 5.854 0.000 30.120
569.825 0.000 0.000 -3.388 -2.618 5.980 0.000 30.120
569.835 0.000 0.000 -4.785 -0.937 5.567 0.000 30.120
569.845 0.000 0.000 -5.599 0.995 4.851 0.000 30.120
569.855 0.000 0.000 -5.987 2.625 3.316 0.000 30.120
569.865 0.000 0.000 -5.835 4.109 1.681 0.000 30.120
569.875 0.000 0.000 -5.157 5.222 -0.105 0.000 30.120
569.885 0.000 0.000 -4.013 5.864 -1.881 0.000 30.120
569.895 0.000 0.000 -2.507 5.977 -3.488 0.000 30.120
569.905 0.000 0.000 -0.776 5.550 -4.781 0.000 30.120
569.915 0.000 0.000 1.026 4.623 -5.642 0.000 30.120
569.925 0.000 0.000 2.735 3.279 -5.994 0.000 30.120
569.935 0.000 0.000 4.198 1.639 -5.885 0.000 30.120
569.945 0.000 0.000 5.281 -0.148 -5.093 0.000 30.120
569.955 0.000 0.000 5.889 -1.923 -3.921 0.000 30.120

```

Figura 6.3: Resultados de la interfaz DEV C++ en funcionamiento.

VI.4. Circuito con Microcontrolador PIC18f4431.

Se obtuvo el diseño en 3D del circuito del PIC mostrado en la Figura 6.4. Cabe mencionar que el circuito lógico mencionado anteriormente se agregó externo a la tarjeta. Este entorno nos sirvió como prototipo experimental para darle giro al motor. Ya que en la siguiente sección podemos observar que el sistema definitivo se maneja con una etapa digital conformada solo por una FPGA, que realiza todas las funciones de este circuito y además es un dispositivo económico el cual ayudó a reducir costos en caso de una posible producción del sistema.



Figura 6.4: Diseño de PCB en 3D para el circuito con el PIC18f4431.

Es importante mencionar que en la imagen anterior se muestran dos transistores, que en físico fueron sustituidos por interruptores porque sólo se utilizaron como modelo para utilizar la configuración de sus pines para aplicar los interruptores. El primero de ellos es el de encendido y apagado del sistema, lo podemos ver en la parte izquierda y en la parte superior derecha utilizamos el segundo interruptor para cambiar el período de muestreo en el que se envían/reciben los datos del PC al PIC. Para la puesta en marcha del circuito se conectó la tarjeta a la PC por medio de un cable USB a serial Db9 marca Manhattan. En el diseño 3D de la tarjeta se observa en la parte inferior izquierda el conector tipo Db9. El resultado de la comunicación serial entre la interfaz en el software Dev C++ y el microcontrolador nos dió

como resultado una interfaz similar a la mostrada en 6.3.

En la Figura 6.5 se muestra el resultado del diseño de PCB del prototipo, también el circuito lógico agregado para reproducir las señales PWM. Además de los tres puentes H conectados a las salidas de las compuertas lógicas.

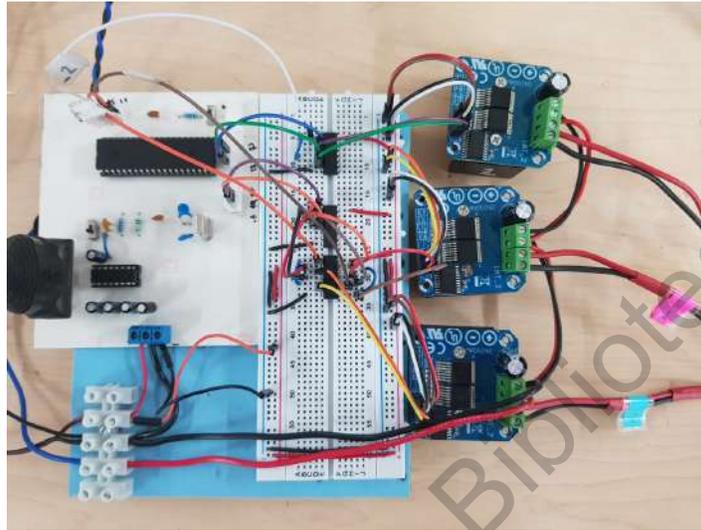


Figura 6.5: Tarjeta electrónica en físico, circuito lógico agregado y puente H IBT2 .

VI.5. Circuito con optoacopladores y FPGA.

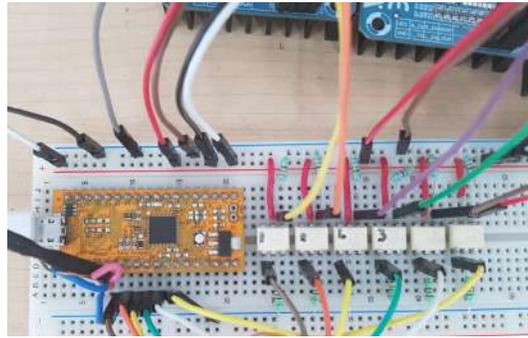


Figura 6.6: Circuito con optoacopladores 4N25.

El diagrama de conexión de los optoacopladores se mostró en la Figura 5.8. En la Figura 6.6 se señala el resultado de conectar los seis optoacopladores, uno para cada señal PWM generada por la FPGA por indicación de la interfaz; además se muestra la salida de los optoacopladores hacia los puentes H para la activación de los PWM. Del lado digital, la tierra de la FPGA queda aislada del resto del circuito. Como podemos ver, el optoacoplador está alimentado del lado de potencia por 5V, que es la señal del PWM de salida, además de que la tierra de la fuente que proporciona esa señal junto con la tierra que alimenta a los puentes H tienen que estar unidas para que se cierre el circuito y el motor gire.

Posteriormente para hacer más compacto el circuito se implementó el siguiente producto, diseñado previamente en Altium Designer:

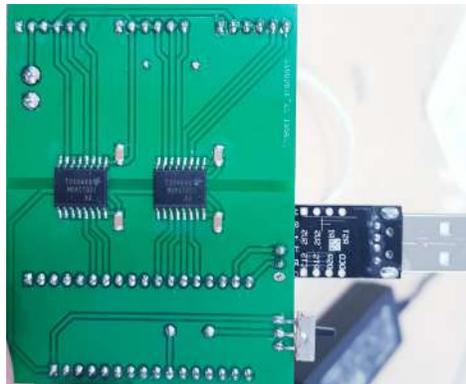


Figura 6.7: Circuito impreso PCB.

La Figura 6.7 muestra la vista posterior de la tarjeta. Se pueden observar los pines de la FPGA y enseguida el botón de reinicio de la misma y el conector FTDI. Además, para reducir el número de optoacopladores se optó por cambiar de modelo, utilizando el Optoacoplador ISO7240. Este es un aislador digital de cuatro canales con configuraciones de múltiples canales y funciones de salida. Estos dispositivos tienen búferes de entrada y salida lógica separados por la barrera de aislamiento de dióxido de silicio (SiO_2) de Texas Instruments. Según su hoja de datos, utilizados junto con fuentes de alimentación aisladas, estos dispositivos ayudan a bloquear el alto voltaje, aislar las tierras y evitar que las corrientes de ruido entren en la tierra local e interfieran o dañen los circuitos sensibles. La familia de dispositivos ISO7240x tiene los cuatro canales en la misma dirección. Por lo que se utilizaron dos optoacopladores ya que se necesitaron seis salidas para las señales PWM.

Por último, en la parte superior de la tarjeta se muestran tres secciones de seis salidas cada una. Éstas salidas con las conexiones hacia los puentes H. Viendo los pines de derecha a izquierda, las primeras dos salidas son las señales PWM que envía la FPGA. El siguiente par de salidas son de voltaje de 5V que son para activar las entradas ENB-R y ENB-L del puente H. Las dos deben de estar activas con el voltaje de entrada, de lo contrario el puente H no funcionará. Las siguientes salidas son de igual manera 5v para alimentar el puente H y GND. También del lado izquierdo se muestran los pines de alimentación positivo y negativo de la tarjeta.

VI.6. Conexión de los puentes H IBT-2 a las tres fases del PMSM y accionamiento.

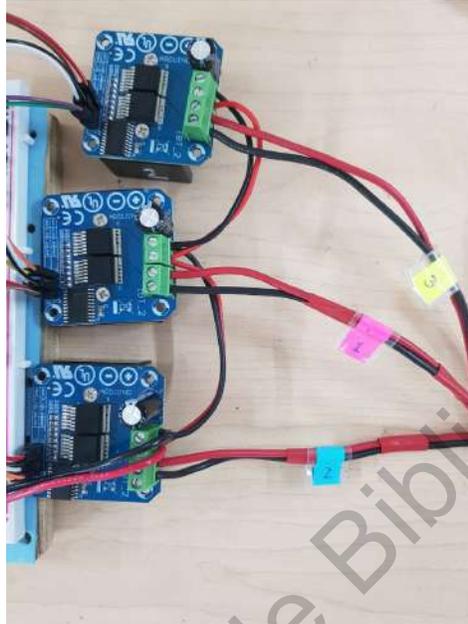


Figura 6.8: Señales PWM conectadas a cada puente H y estos a su vez a cada fase del motor.

Como se indicó en diagramas anteriores, las señales PWM generadas por la FPGA y que posteriormente se aislaron con optoacopladores, se conectaron en el R y el L PWM, que son los giros hacia la derecha e izquierda del puente H respectivamente. Como siguiente resultado, teniendo estas señales del otro lado del optoacoplador 4N25, activaron las salidas de voltaje de cada fase del motor y esto lo impulsó y tuvo un giro constante. Como prueba inicial, la fuente en uso fue de 12V y los puentes H conectados en paralelo. En la Figura 6.8, además podemos ver que las fases fueron enumeradas y conectadas a los puentes H de modo que el motor tuviera un sentido de giro en contra de las manecillas del reloj, visto desde el motor, ya que este trabajo lo requiere de esa manera.

VI.7. Acoplamiento del nuevo sistema al refrigerador.

Se diseñó un diagrama de conexiones para el nuevo compresor. El sistema que tenemos es de refrigeración con compresor en paralelo, es decir, que puede funcionar solo un compresor o los dos, en nuestro caso solo uno para determinar como cambia la eficiencia energética al conectar uno u otro cerrando las válvulas mostradas en la Figura 6.9. El punto 1 es la entrada del refrigerante en forma de gas en baja presión al compresor. En el punto 2 línea (tubería) de alta presión, es la salida del compresor hacia el condensador. En 3 es la entrada del refrigerante en forma de gas en alta presión al condensador y 4 es la entrada del refrigerante en forma de líquido al evaporador.

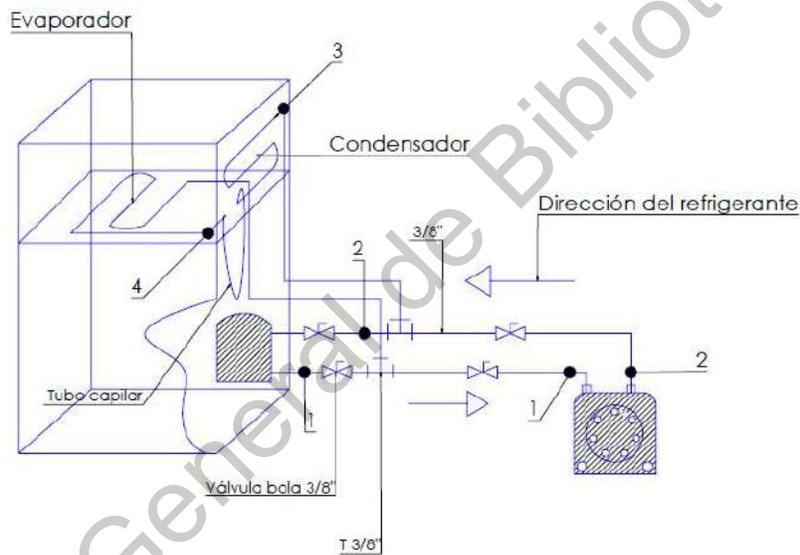


Figura 6.9: Diagrama de conexiones de ambos compresores en el refrigerador.

Como se puede observar en 6.10, tenemos el sistema en físico. Las tuberías que vienen de fábrica en el refrigerador quedaron acopladas al compresor automotriz el cual a su vez es impulsado por el motor PMSM que será alimentado por la fuente de 24V. Las válvulas de paso, que se pueden observar, son las encargadas de determinar dependiendo de su estado (abierta o cerrada) que compresor es el que se utiliza.



Figura 6.10: Conexión de la tubería del refrigerador con el nuevo compresor automotriz.

Hasta este punto, se realizaron pruebas con el motor ESTUN acoplado al compresor y sin poner el marcha el refrigerador. El motor no fue capaz de impulsar al compresor con el voltaje de bus de 24 V, por lo que éste tendía a sobre calentarse y a realizar incluso movimientos de giro forzado produciendo vibraciones. Además las conexiones de succión y descarga del compresor no eran las correctas y se corría el riesgo de tener fugas de presión. Debido a la falta de conectores adecuados para sellar estas terminales se requiere efectuar un diseño propio. Por todo lo anterior se decidió cambiar de compresor, por uno de refrigeración automotriz modelo York y un motor PMSM de más HP con el fin de realizar la experimentación y que la hipótesis no surgiera negativa. El inconveniente con este compresor fueron las conexiones de igual forma, debido a que en el sector de la refrigeración cada componente tiene sus propios diseños de componentes por lo que no es nada sencillo encontrar repuestos. Finalmente se encontraron unas terminales tipo rosca rotalock que funcionaron como repuesto de las conexiones originales para poder unir la salida y la succión del compresor automotriz a las tuberías del refrigerador. Sin embargo, debido a la contingencia sanitaria del COVID-19 los laboratorios de la Facultad de Ingeniería fueron cerrados desde el pasado 18 de marzo de 2020 y no se ha podido hasta el momento realizar los experimentos posteriores a este paso, los cuales son el acoplamiento del nuevo compresor y el motor al refrigerador y las mediciones de energía para verificar la eficiencia energética.

VII. CONCLUSIONES

- Un wathorímetro de bajo costo modelo COIL CT 061 para medir energía en CA muestra las mismas mediciones que un FLUKE 435 que es un analizador energía de alta calidad utilizado en aplicaciones industriales.
- Mover un motor ESTUN modelo EMJ-04APB22 con la topología mostrada en este trabajo fue posible, sin embargo es necesario, como trabajo futuro, el arranque controlado del motor del compresor para evitar picos de potencia que solo sobredimensionan la capacidad instalada, además de hacer el comparativo con el control por campo orientado (FOC) de temperatura, evitando el control encendido/apagado y usar control modulado para evaluar los impactos energéticos y en mantenimiento.
- Un motor ESTUN EMJ-04APB22 requiere de un bus de más de 24V para alimentar cada una de sus fases y pueda operar con más potencia sin producir vibraciones. Además que este modelo de motor PMSM no fué capaz, con el voltaje manejado de 24V, de mover el compresor automotriz marca DENSO con el gas refrigerante cargado en el sistema, ya que solo lo movió en vacío.
- Un compresor automotriz requiere un motor PMSM de 2 HP lo que resulta en un costo de al menos \$12,000, que es una inversión no factible en este momento para un refrigerador doméstico.
- No se tienen compresores comerciales de 0.25 HP o de 0.5HP con flecha para propulsarse con un PMSM, lo que implica diseñar y construir el compresor de esta capacidad para trabajar con refrigeración doméstica.
- El compresor automotriz con flecha para que lo mueva un motor PMSM se debe probar en refrigeración comercial para demostrar un incremento de eficiencia respecto a los

sistemas propulsados por motores de inducción.

- El compresor automotriz con flecha para que lo mueva un motor PMSM se debe probar en aire acondicionado para demostrar un incremento de eficiencia respecto a los sistemas propulsados por motores de inducción.
- Para validar las mediciones de energía obtenidas, en caso de requerir producir un nuevo sistema de ahorro energético, es necesario realizar el proceso que está descrito en el Apéndice A de la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2018, de eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos, límites, métodos de prueba y etiquetado. El cual es el método de prueba uniforme para la medición del consumo de energía de los refrigeradores, refrigeradores-congeladores y otros aparatos de refrigeración.
- Es necesario un banco de pruebas de refrigeración con conexiones roscadas y avellanados comerciales que permita probar gases refrigerantes flamables sin usar soldaduras con soplete.
- Como trabajo futuro se propone trabajar con el control por campo orientado, control de velocidad y control modulado para mover el motor PMSM del compresor del sistema de refrigeración para probar los efectos de estos controles en la eficiencia energética.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaide, Fernando. 2016. Diseño de un control basado en FPGA para un inversor en puente trifásico. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Aplicada, Electrica. 2020. Potencia aparente. [urlhttps://www.electricaplicada.com/](https://www.electricaplicada.com/).
- Apra, C, G Cardillo, A Greco, A Maiorino and C Masselli. 2016. A rotary permanent magnet magnetic refrigerator based on AMR cycle. *Applied Thermal Engineering* 101:699–703.
- Automation, Anaheim. 2015. EMJ-04 Series Servo Motor. "Hoja de datos".
- Autoparts, Denso. 2020. A/C compressors. <https://densoautoparts.com/ac-compressors>.
- Axaopoulos, Petros J and Michael P Theodoridis. 2009. Design and experimental performance of a PV Ice-maker without battery. *Solar Energy* 83:1360–1369.
- Azmi, WH, MZ Sharif, TM Yusof, Rizalman Mamat and AAM Redhwan. 2017. Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69:415–428.
- Balamuru, Vinay G, Osama M Ibrahim and Stanley M Barnett. 2000. Simulation of ternary ammonia–water–salt absorption refrigeration cycles. *International journal of refrigeration* 23:31–42.
- Bhattad, Atul, Jahar Sarkar and Pradyumna Ghosh. 2018. Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82:3656–3669.
- Bose, Bimal K. 2006. *Power electronics and motor drives: advances and trends*. Elsevier USA.

- Cao, Qiang, Zheng Sun, Zimu Li, Mingkai Luan, Xiao Tang, Peng Li, Zhenhua Jiang and Li Wei. 2019. Reduction of real gas losses with a DC flow in the regenerator of the refrigeration cycle. *Applied energy* 235:139–146.
- Cengel, Yunus A and Michael A Boles. 2011. *Thermodynamics: an engineering approach*. Mc Graw Hill. New York.
- Cheng, Wen-Long, Bao-Jun Mei, Yi-Ning Liu, Yong-Hua Huang and Xu-Dong Yuan. 2011. A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation. *Energy* 36:5797–5804.
- Cheng, Wen-long, Miao Ding, Xu-dong Yuan and Bing-Chuan Han. 2017. Analysis of energy saving performance for household refrigerator with thermal storage of condenser and evaporator. *Energy Conversion and Management* 132:180–188.
- Choi, Han Ho, Nga Thi-Thuy Vu and Jin-Woo Jung. 2010. Digital implementation of an adaptive speed regulator for a PMSM. *IEEE Transactions on Power Electronics* 26:3–8.
- Choi, Seyoung, Ukmin Han, Honghyun Cho and Hoseong Lee. 2018. Recent advances in household refrigerator cycle technologies. *Applied thermal Engineering* 132:560–574.
- CONAGUA. 2018. *Estadísticas del agua en México 2018*. Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua de la CONAGUA. México.
- Daewoo. 2010. *Service Manual Refrigerator Model Fr-142*. Daewoo.
- Daffallah, KO. 2018. Experimental study of 12V and 24V photovoltaic DC refrigerator at different operating conditions. *Physica B: Condensed Matter* 545:237–244.
- Daffallah, KO, M Benganem, SN Alamri, AA Joraid and AA Al-Mashraqi. 2017. Experimental evaluation of photovoltaic DC refrigerator under different thermostat settings. *Renewable Energy* 113:1150–1159.
- Darzi, Milad, MK Sadoughi and M Sheikholeslami. 2018. Condensation of nano-refrigerant inside a horizontal tube. *Physica B: Condensed Matter* 537:33–39.

- De Carvalho, Stella Maia Rocha, Luiz Henrique Parolin Massuchetto, Raiza Barcelos Corrêa do Nascimento, Hugo Valença de Araújo and José Vicente Hallak d'Angelo. 2019. Optimization of a vapor injection refrigeration cycle using hydrocarbon mixed refrigerants. *International Journal of Refrigeration* 98:109–119.
- El-Bahloul, Asmaa Ahmed M, Ahmed Hamza H Ali and Shinichi Ookawara. 2015. Performance and sizing of solar driven dc motor vapor compression refrigerator with thermal storage in hot arid remote areas. *Energy Procedia* 70:634–643.
- Engelbrecht, Kurt, Christian Robert Haffenden Bahl and Kaspar Kirstein Nielsen. 2011. Experimental results for a magnetic refrigerator using three different types of magnetocaloric material regenerators. *International Journal of refrigeration* 34:1132–1140.
- Espíndola, Eduardo. 2017. Serie de Fourier como controlador auto-ajustable para sistemas sometidos a perturbaciones periódicas. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
- Fernandes, MS, GJVN Brites, JJ Costa, AR Gaspar and VAF Costa. 2014. Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39:102–123.
- González, Manuel I and Luis R Rodríguez. 2007. Solar powered adsorption refrigerator with CPC collection system: Collector design and experimental test. *Energy conversion and management* 48:2587–2594.
- Goyal, Parash, Prashant Baredar, Arvind Mittal and Ameenur R Siddiqui. 2016. Adsorption refrigeration technology—An overview of theory and its solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53:1389–1410.
- Gupta, BL, Mayank Bhatnagar and Jyotirmay Mathur. 2014. Optimum sizing of PV panel, battery capacity and insulation thickness for a photovoltaic operated domestic refrigerator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 7:55–67.
- Hamed, Mouna, Ali Fellah and Ammar Ben Brahim. 2012. Optimization of a solar driven absorption refrigerator in the transient regime. *Applied energy* 92:714–724.

Harrington, Lloyd, Lu Aye and Bob Fuller. 2018. Impact of room temperature on energy consumption of household refrigerators: Lessons from analysis of field and laboratory data. *Applied Energy* 211:346–357.

Hernández, JA, W Rivera, D Colorado and G Moreno-Quintanar. 2012. Optimal COP prediction of a solar intermittent refrigeration system for ice production by means of direct and inverse artificial neural networks. *Solar Energy* 86:1108–1117.

Infineon, Technologies. 2004. High Current PN Half Bridge. "Hoja de datos".

Kattakayam, Thomachan A and K Srinivasan. 2000. Thermal performance characterization of a photovoltaic driven domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration* 23:190–196.

Kishor Verma, Jai and Raja Sekhar Dondapati. 2017. Techno-economic sizing analysis of solar PV system for Domestic Refrigerators. *Energy Procedia* 109:286–292.

Kitanovski, Andrej and Peter W Egolf. 2009. Application of magnetic refrigeration and its assessment. *Journal of magnetism and magnetic materials* 321:777–781.

Lemmini, Fatiha and Abdelmoussehel Errougani. 2007. Experimentation of a solar adsorption refrigerator in Morocco. *Renewable Energy* 32:2629–2641.

Liu, Yicai, Tianlong Xin, Lihong Cao, Chao Wan and Mingyan Zhang. 2010. Compression-injection hybrid refrigeration cycles in household refrigerators. *Applied Thermal Engineering* 30:2442–2447.

Lizarte, Frío S.a. 2011. Compresores de aire acondicionado de automoción: Elementos y tipos. Lizarte Frío s.a.

Lu, Zhili and Guoliang Ding. 2006. Temperature and time-sharing running combination control strategy of two-circuit cycle refrigerator–freezer with parallel evaporators. *Applied thermal engineering* 26:1208–1217.

- Megdouli, K, BM Tashtoush, E Nahdi, M Elakhdar, A Mhimid and L Kairouani. 2017. Performance analysis of a combined vapor compression cycle and ejector cycle for refrigeration cogeneration. *International Journal of Refrigeration* 74:517–527.
- Min, Gao and DM Rowe. 2006. Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators. *Applied Energy* 83:133–152.
- Modi, Anish, Anirban Chaudhuri, Bhavesh Vijay and Jyotirmay Mathur. 2009. Performance analysis of a solar photovoltaic operated domestic refrigerator. *Applied Energy* 86:2583–2591.
- Monfared, Behzad and Björn Palm. 2018. Material requirements for magnetic refrigeration applications. *International Journal of Refrigeration* 96:25–37.
- Monfared, Behzad, Richard Furberg and Björn Palm. 2014. Magnetic vs. vapor-compression household refrigerators: a preliminary comparative life cycle assessment. *International journal of refrigeration* 42:69–76.
- Moran, Michael J. 2018. *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverte España.
- Ndoye, Fatou Toutie, Patrick Schallbart, Denis Leducq and Graciela Alvarez. 2015. Numerical study of energy performance of nanofluids used in secondary loops of refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration* 52:122–132.
- NOM-015-ENER-2018. 2018. Norma mexicana de eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado http://dof.gob.mx/nota_to_doc.php.
- Opoku, R, S Anane, IA Edwin, MS Adaramola and R Seidu. 2016. Comparative techno-economic assessment of a converted DC refrigerator and a conventional AC refrigerator both powered by solar PV. *International Journal of Refrigeration* 72:1–11.
- Otanicar, Todd, Robert A Taylor and Patrick E Phelan. 2012. Prospects for solar cooling—An economic and environmental assessment. *Solar Energy* 86:1287–1299.

- Ouali, Maamar, Med Ali Djebiret, Randha Ouali, Mehdi Mokrane, Nachida Kesbadji Merzouk and Ahcene Bouabdallah. 2017. Thermal control influence on energy efficiency in domestic refrigerator powered by photovoltaic. *International Journal of Hydrogen Energy* 42:8955–8961.
- Piai, Juliani Chico, Rodolfo Dourado Maia Gomes and Gilberto De Martino Jannuzzi. 2020. Integrated resources planning as a tool to address energy poverty in Brazil. *Energy and Buildings* 214:109817.
- Prashantha, BG, MS Govinde Gowda, S Seetharamu and GSVL Narasimham. 2018. Design and analysis of acoustically-driven 50 W thermoacoustic refrigerators. *Sādhanā* 43(6):82.
- Puebla, Jorge. 2005. *Manual de Buenas Prácticas en Refrigeración*. Venezuela ONUDI.
- Rahpeima, R and R Ebrahimi. 2019. Numerical investigation of the effect of stack geometrical parameters and thermo-physical properties on performance of a standing wave thermoacoustic refrigerator. *Applied Thermal Engineering* 149:1203–1214.
- Rasti, M, MS Hatamipour, SF Aghamiri and M Tavakoli. 2012. Enhancement of domestic refrigerators energy efficiency index using a hydrocarbon mixture refrigerant. *Measurement* 45:1807–1813.
- Rincón-Casado, A, A Martínez, M Araiz, P Pavón-Domínguez and D Astrain. 2018. An experimental and computational approach to thermoelectric-based conditioned mattresses. *Applied Thermal Engineering* 135:472–482.
- Rivera, CO and W Rivera. 2003. Modeling of an intermittent solar absorption refrigeration system operating with ammonia–lithium nitrate mixture. *Solar energy materials and solar cells* 76:417–427.
- Rolle, Kurt C. 2006. *Termodinámica*. Pearson Educación México.
- Rostamzadeh, Hadi, Javad Rostamzadeh, Pouria Seyed Matin and Hadi Ghaebi. 2018. Novel dual-loop bi-evaporator vapor compression refrigeration cycles for freezing and air-conditioning applications. *Applied Thermal Engineering* 138:563–582.

- Sanukrishna, SS, Maneesh Murukan and Prakash M Jose. 2018. An overview of experimental studies on nanorefrigerants: Recent research, development and applications. *International Journal of Refrigeration* 88:552–577.
- Sarbu, Ioan and Calin Sebarchievici. 2015. General review of solar-powered closed sorption refrigeration systems. *Energy Conversion and Management* 105:403–422.
- Solargis. 2019. Direct Normal Irradiation. [urlhttps://solargis.com/maps-and-gis-data/download/mexico](https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/mexico).
- Soliman, Aly MA, Ali K Abdel Rahman and S Ookawara. 2018. Enhancement of vapor compression cycle performance using nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* :1–14.
- Sur, Anirban and Randip K Das. 2010. Review on solar adsorption refrigeration cycle. *International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET)* 1:190–226.
- Tartibu, LK. 2019. Developing more efficient travelling-wave thermo-acoustic refrigerators: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 31:102–114.
- Tijani, MEH, JCH Zeegers and ATAM De Waele. 2002a. Construction and performance of a thermoacoustic refrigerator. *Cryogenics* 42:59–66.
- Tijani, MEH, JCH Zeegers and ATAM De Waele. 2002b. Design of thermoacoustic refrigerators. *Cryogenics* 42:49–57.
- Tina, Giuseppe Marco and Alfio Dario Grasso. 2014. Remote monitoring system for stand-alone photovoltaic power plants: The case study of a PV-powered outdoor refrigerator. *Energy conversion and management* 78:862–871.
- Trejo-Perea, M, G Herrera-Ruiz, D Vargas-Vázquez, R Luna-Rubio and GJ Ríos-Moreno. 2011. System electrical power monitoring manifold based on software development and an embedded system for intelligent buildings. *Journal of Energy Engineering* 137:1–10.
- Tušek, Jaka, Samo Zupan, Alen Šarlah, Ivan Prebil and Alojz Poredoš. 2010. Development of a rotary magnetic refrigerator. *International Journal of Refrigeration* 33:294–300.

- Ullah, KR, R Saidur, HW Ping, RK Akikur and NH Shuvo. 2013. A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24:499–513.
- Wang, DC, YH Li, D Li, YZ Xia and JP Zhang. 2010. A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems. *Renewable and sustainable energy reviews* 14:344–353.
- Wang, RZ. 2001. Adsorption refrigeration research in Shanghai Jiao Tong University. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5:1–37.
- Weiner, C and I Shonle. 2011. Uso de un monitor de Energía para Controlar sus Costos de Electricidad. Hoja de datos (Colorado State University, Extension). Series al consumidor; no. 10.628 .
- Woo, Seong-woo, Michael Pecht and Dennis L O’Neal. 2020. Reliability design and case study of the domestic compressor subjected to repetitive internal stresses. *Reliability Engineering & System Safety* 193:106–118.
- Xu, Qingyu, Ding Lu, Gaofer Chen, Hao Guo, Xueqiang Dong, Yanxing Zhao, Jun Shen and Maoqiong Gong. 2019. Experimental study on an absorption refrigeration system driven by temperature-distributed heat sources. *Energy* 170:471–479.
- Xu, ZY and RZ Wang. 2016. Absorption refrigeration cycles: categorized based on the cycle construction. *International Journal of Refrigeration* 62:114–136.
- Yang, Liu, Weixue Jiang, Xielei Chen and Kai Du. 2017. Dynamic characteristics of an environment-friendly refrigerant: ammonia-water based TiO₂ nanofluids. *International Journal of Refrigeration* 82:366–380.
- Yang, Rui, Yi Wang, Ye Feng, Tao Jin and Ke Tang. 2019. Performance of a looped thermoacoustic engine with multiple loads capable of utilizing heat source below 200Å° C. *Applied Thermal Engineering* 148:516–523.

- Yoon, Won Jae, Hae Won Jung, Hyun Joon Chung and Yongchan Kim. 2011. Performance optimization of a two-circuit cycle with parallel evaporators for a domestic refrigerator-freezer. *International journal of refrigeration* 34:216–224.
- You, Yonghua, Zhongda Wu, Ping'an Chen, Hu Ji, Xican Zeng, Xuecheng Xu and Fangqin Dai. 2018. Improving magnetic refrigerator performances by enhancing convection heat transfer with staggered twin-wedged elements. *Applied Thermal Engineering* 132:423–431.
- Yu, Bingfeng, Min Liu, Peter W Egolf and Andrej Kitanovski. 2010. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. *International Journal of refrigeration* 33:1029–1060.
- Yuan, Weixing, Bo Yang, Yufei Yang, Kexian Ren, Jian Xu and Yibing Liao. 2015. Development and experimental study of the characteristics of a prototype miniature vapor compression refrigerator. *Applied Energy* 143:47–57.
- Yuan, Xu-Dong and Wen-Long Cheng. 2014. Multi-objective optimization of household refrigerator with novel heat-storage condensers by Genetic algorithm. *Energy Conversion and Management* 84:550–561.
- Yusufoglu, Y, T Apaydin, S Yilmaz and HO Paksoy. 2015. Improving performance of household refrigerators by incorporating phase change materials. *International Journal of Refrigeration* 57:173–185.
- Zendehboudi, Alireza, Adrián Mota-Babiloni, Pavel Makhnatch, R Saidur and Sadiq M Sait. 2019. Modeling and multi-objective optimization of an R450A vapor compression refrigeration system. *International Journal of Refrigeration* .
- Zhai, XQ, M Qu, Yue Li and RZ Wang. 2011. A review for research and new design options of solar absorption cooling systems. *Renewable and sustainable energy reviews* 15:4416–4423.
- Zhong, Li, Mr F Rahman, W Yetal Hu and KW Lim. 1997. Analysis of direct torque control

in permanent magnet synchronous motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics* 12(3):528–536.

Zhu, Shaowei. 2018. A new concept of cold resonator pulse tube refrigerator. *Energy* 144:1026–1036.

Zolpakar, Nor Atiqah, Normah Mohd-Ghazali and Mawahib Hassan El-Fawal. 2016. Performance analysis of the standing wave thermoacoustic refrigerator: A review. *Renewable and sustainable energy reviews* 54:626–634.

Zolpakar, Nor Atiqah, Normah Mohd-Ghazali, Robiah Ahmad and Thierry Maré. 2017. Performance of a 3D-printed stack in a standing wave thermoacoustic refrigerator. *Energy Procedia* 105:1382–1387.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

A. PROGRAMAS UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

A.1. Código de recepción y envío de señales PWM

```
module PWM3s(  
    input rst,  
    input Rx,  
    output [1:0] Sa,  
    output [1:0] Sb,  
    output [1:0] Sc  
);  
  
    wire clk;  
    wire Rx_aux;  
    wire eoRx_int1;  
    wire h,h1,h2,h3,h4;  
    wire PWMsa,PWMsb,PWMsc;  
    wire igual;  
    wire [1:0] opc,q;  
    wire [1:0] st_PWM;  
    wire [7:0] data_rx,X,match1,match2,match3;  
    wire [9:0] BR;  
  
    FLIPFLOP_n          U0 (rst,clk,Rx,Rx_aux);  
    UART_Rx            #(10) U1 (rst,clk,Rx_aux,BR,data_rx,int1,eoRx);  
    FSM_UART_NBytes_Rx U2 (rst,clk,int1,igual,h,opc);  
    CONTADOR_ASCENDENTE_CLEAR #(2) U3 (rst,clk,opc,q);  
    DEMUX_1a4          U4 (q,h,h1,h2,h3,h4);  
    REGISTRO_PARALELO_HOLD #(8) U5 (rst,clk,h1,data_rx,X);  
    REGISTRO_PARALELO_HOLD #(8) U6 (rst,clk,h2,data_rx,match1);  
    REGISTRO_PARALELO_HOLD #(8) U7 (rst,clk,h3,data_rx,match2);  
    REGISTRO_PARALELO_HOLD #(8) U8 (rst,clk,h4,data_rx,match3);  
    PWM_20K            U9 (rst,clk,st_PWM,match1[6:0],PWMsa);  
    PWM_20K            U10 (rst,clk,st_PWM,match2[6:0],PWMsb);  
    PWM_20K            U11 (rst,clk,st_PWM,match3[6:0],PWMsc);  
  
    SB_HFOSC           CLOCK(1'b1.1'b1,clk) /* synthesis  
    ROUTE_THROUGH_FABRIC= 0 */; defparam CLOCK.CLKHF_DIV = "0b10";  
  
    assign BR = 10'b1001110000;  
    assign igual = (q == 2'b11) ? 1'b1 : 1'b0;  
    assign st_PWM = (X == 8'b10101010) ? 2'b01 : 2'b11;  
  
    assign Sa[0] = PWMsa & match1[7];  
    assign Sa[1] = PWMsa & ~match1[7];  
  
    assign Sb[0] = PWMsb & match2[7];  
    assign Sb[1] = PWMsb & ~match2[7];  
  
    assign Sc[0] = PWMsc & match3[7];  
    assign Sc[1] = PWMsc & ~match3[7];  
  
endmodule
```

A.2. Código en Dev C++ para envío de señales senoidales

```
#include <iostream>
#include <string.h>
#include <dos.h>
#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>

#define Ts      0.005
#define pi_    3.141593

#define Vmax   24

unsigned char flagcom=0, flagfile=0, pwmf1, pwmf2, pwmf3;

unsigned short int pos;    //de 16 bits
float iTs=1/Ts;
float pf,e,u,up=0,ud=0,e_1=0;
float t=0;
float pwm1=0, pwm2=0, pwm3=0;

float f=0.1;

using namespace std;

int main()
{
    HANDLE h; /*handler, sera el descriptor del puerto*/
    DCB dcb; /*estructura de configuracion*/
    DWORD dwEventMask; /*mascara de eventos*/
    FILE *fp;

    if((fp=fopen("motor_cd.txt","w+"))==NULL)
    {
        printf("No se puede abrir el archivo.\n");
        exit(1);
    }
    /*abrimos el puerto*/
    h=CreateFile("COM3",GENERIC_READ|GENERIC_WRITE,0,NULL,OPEN_EXISTING,0,NULL);

    if(h == INVALID_HANDLE_VALUE)
    {
        printf("No se puede abrir el PUERTO.\n");
    }

    /*obtenemos la configuracion actual*/
    if(!GetCommState(h, &dcb))
    {
        /*error: no se puede obtener la configuracion*/
    }
}
```

```

/*Configuramos el puerto*/
dcb.BaudRate = 115200;
dcb.ByteSize = 8;
dcb.Parity = NOPARITY;
dcb.StopBits = ONESTOPBIT;
dcb.fBinary = TRUE;
dcb.fParity = TRUE;

/* Establecemos la nueva configuracion */
if(!SetCommState(h, &dcb))
{
    /* Error al configurar el puerto */
}

DWORD n;

char enviar;

int recibido;

/* Para que WaitCommEvent espere el evento RXCHAR */
SetCommMask(h, EV_RXCHAR);
while(1)
{
    recibido=0;
    /* Enviamos... */

    /* De la llamada a WaitCommEvent solo se retorna cuando ocurra51.
    * el evento seteado con SetCommMask */
    // WaitCommEvent(h, &dwEventMask, NULL);
    /* Recibimos algun dato!*/
    while(1)
    {
        ReadFile(h, &recibido, 1/* leemos un byte */, &n, NULL);
        if(!n)
            break;
        else
        {
            if((recibido==0xAA)&&(flagcom==0))
            {
                flagcom++;

                pwm1=Vmax*sin(2*pi_*f*t)*100/Vmax;
                if(pwm1 <0)
                {
                    pwm1 = 128+abs(pwm1);
                }

                pwm2=Vmax*sin((2*pi_*f*t)+(2*pi_/3))*100/Vmax;
                if(pwm2 <0)
                {
                    pwm2 = 128+abs(pwm2);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        pwm3=Vmax*sin((2*pi_*f*t)-(2*pi_/3))*100/Vmax;
        if(pwm3 <0)
        {
            pwm3 = 128+abs(pwm3);
        }

        pwmf1=(unsigned char)pwm1;    //convierte a 8 bits
        pwmf2=(unsigned char)pwm2;
        pwmf3=(unsigned char)pwm3;

        //mandando byte
        enviar=pwmf1;
        if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
        {
            /* Error al enviar */
        }
    }

    enviar=170;
    if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
    {
        /* Error al enviar */
    }
    enviar=pwmf2;
    if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
    {
        /* Error al enviar */
    }
    enviar=pwmf3;
    if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
    {
        /* Error al enviar */
    }

    //Imprimiendo en pantalla
    //printf("%3.3f\n",pf);

    flagcom=0;

    t=t+Ts;
    }
    //cierre del else
    //printf("%c",recibido);
    //cout << "recibido; /* mostramos en pantalla */
    //CIERRE WHILE()
} //CIERRE WHILE()
fclose(fp);
return 0;
}

```

A.3. Código en Dev C++ para el envío de un solo ciclo de señal senoidal

```
#include <iostream>
#include <string.h>
#include <dos.h>
#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>

#define Ts      0.001
#define pi_    3.141593

#define Vmax    24

unsigned char flagcom=0, flagfile=0, pwmf1, pwmf2, pwmf3;

unsigned short int pos;    //de 16 bits
float iTs=1/Ts;
float pf,e,u,up=0,ud=0,e_1=0;
float t=0;
float pwm1=0, pwm2=0, pwm3=0;

float f=1; //Hz
int i=0;
int vec=0;
int vec_aux;
unsigned char nh;
unsigned char nl;
float escv=100/Vmax;
float w=2*pi_*f;
float w1 = 2*pi_/3;
float Vd= 24;
using namespace std;
int main()
{
    vec = ((1/f)/Ts);

    float pwm1[vec];
    float pwm2[vec];
    float pwm3[vec];
    unsigned char pwmf1_1[vec];
    unsigned char pwmf2_1[vec];
    unsigned char pwmf3_1[vec];
    HANDLE h; //handler, sera el descriptor del puerto/
    DCB dcb; ///estructura de configuracion/
    DWORD dwEventMask; ///mascara de eventos/
    FILE *fp;
```

```

if((fp=fopen("motor_c.txt","w+"))==NULL)
    {
    printf("No se puede abrir el archivo.\n");
    exit(1);
    }
//abrimos el puerto/
h=CreateFile("COM6",GENERIC_READ|GENERIC_WRITE,0,NULL,OPEN_EXISTING,0,NULL);

if(h == INVALID_HANDLE_VALUE)
    {
    printf("No se puede abrir el PUERTO.\n"); ///ocurrio un error
    }

    ///obtenemos la configuracion actual/
    if(!GetCommState(h, &dcb))
    {
    // /error: no se puede obtener la configuracion/
    }

///Configuramos el puerto/
    dcb.BaudRate = 9600;
    dcb.ByteSize = 8;
    dcb.Parity = NOPARITY;
    dcb.StopBits = ONESTOPBIT;
    dcb.fBinary = TRUE;
    dcb.fParity = TRUE;

/* Establecemos la nueva configuracion */
if(!SetCommState(h, &dcb))
    {
    /* Error al configurar el puerto */
    }

DWORD n;

char enviar;

int recibido;

/* Para que WaitCommEvent espere el evento RXCHAR */
SetCommMask(h, EV_RXCHAR);

printf("%d\n", vec);
for(i=0;i<vec;i++){
    t=i*Ts;
    pwm1[i]=Vd*sin(w*t)*escv;
    if(pwm1[i] <0)
    {
        pwm1[i] = 128+abs(pwm1[i]);
    }

    pwm2[i]=Vd*sin(w*t - w1)*escv;
    if(pwm2[i] <0)
    {
        pwm2[i] = 128+abs(pwm2[i]);
    }
}

```

```

pwm3[i]=Vd*sin(w*t+ w1)*escv;
if(pwm3[i] <0)
{
    pwm3[i] = 128+abs(pwm3[i]);
}
pwmf1_1[i]=(unsigned char)pwm1[i];    //convierte a 8 bits
pwmf2_1[i]=(unsigned char)pwm2[i];
pwmf3_1[i]=(unsigned char)pwm3[i];

printf("%d\t%d\t%d\t%d\n",pwmf1_1[i],pwmf2_1[i],pwmf3_1[i]);

}
vec_aux=(vec-1)&0Xff00;
nh=vec_aux>>8;
nl=(vec-1)&0X00ff;

printf("%d\t %d\n",nh,nl);

enviar=nh;
if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
{
    /* Error al enviar */
}
Sleep(20);

enviar=nl;
if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
{
    /* Error al enviar */
}
Sleep(20);
for(i=0;i <vec;i++){

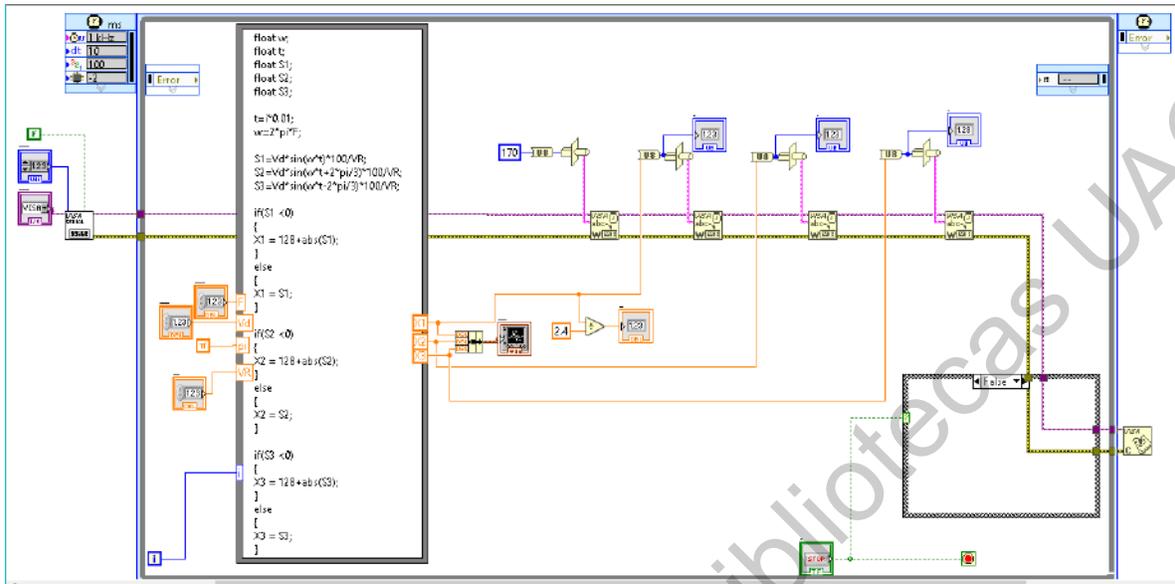
    enviar=pwmf1_1[i];
    if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
    {
        /* Error al enviar */
    }
    Sleep(20);
}
for(i=0;i <vec;i++){

    enviar=pwmf2_1[i];
    if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
    {
        /* Error al enviar */
    }
    Sleep(20);
}
for(i=0;i <vec;i++){

    enviar=pwmf3_1[i];
    if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
    {
        /* Error al enviar */
    }
    Sleep(20);
}
fclose(fp);
return 0;
}

```

A.4. Diagrama de bloques en Labview



A.5. Programa en Software Matlab para graficar los datos generados en archivo de texto, por los programas en Dev C++

```
%Gráfica de señales senoidales enviadas.
clc;
clear all;
close all;
%leyendo las muestras tomadas al sistema
fid=fopen('MONIT.txt','r');
datos=fscanf(fid, '%f', [3 inf]); % datos tiene 3 renglones
fclose(fid);
u1=datos(1,:);
u2=datos(2,:);
u3=datos(3,:);

n=length(u1);

for i=1:n

    if(u1(i) > 127)
        u1(i) = u1(i) - 128;
    end
    if(u2(i) > 127)
        u2(i) = u2(i) - 128;
    end
    if(u3(i) > 127)
        u3(i) = u3(i) - 128;
    end
end

figure(1)
plot(u1);
hold on;
plot(u2);
hold on;
plot(u3);
hold on;
grid on;
```

A.6. Programa de envío de datos al PIC18f4431.

```
#include <iostream>
#include <string.h>
#include <string.h>
#include <dos.h>
#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>

#define omega1 6.28 //6.28
#define tope_w 30.12
#define Ts 0.01
#define ppr 160.0
#define pi_ 3.141593

#define kp 3.18
#define k1 0.0
#define kd 0.0

#define kd 0.0

#define VM 6.25//sera 22.5
#define VNM 6.0

float w =2;
float omega;
unsigned char flagcom=0,flagfile=0,signo_sal,pwm1,pwm2,pwm3; //de 8 bits
unsigned short int pos; //de 16 bits
float r=pi_/4,y,e=pi_,e_1,u,pwmf,t=0,esc=pi_/(2*ppr),iT=1/Ts,escs=127/VM,u1,u2,u3,pwmf1,pwmf2,pwmf3;
float integral=0,proporcional,derivativa;

using namespace std;
int main()
{
    HANDLE h; /*handler, sera el descriptor del puerto*/
    UCB dcb; /*estructura de configuracion*/
    DWORD dwEventMask; /*mascara de eventos*/
    FILE *fp;

    if((fp=fopen("MONIT.txt","w+"))==NULL)
    {
        printf("No se puede abrir el archivo.\n");
        exit(1);
    }

    /*abrimos el

    puerto*/
    h=CreateFile("COM3",GENERIC_READ|GENERIC_WRITE,0,NULL,OPEN_EXISTING,0,NULL);
    if(h == INVALID_HANDLE_VALUE)
    {
        /*ocurrio un error al intentar abrir el puerto*/
    }
}
```

```

        /*obtenemos la configuracion actual*/
        if(!GetCommState(h, &dcb))
        {
            /*error: no se puede obtener la configuracion*/
        }
    }

    /*Configuramos el puerto*/
    dcb.BaudRate = 115200;
    dcb.ByteSize = 8;
    dcb.Parity = NOPARITY;
    dcb.StopBits = ONESTOPBIT;
    dcb.fBinary = TRUE;
    dcb.fParity = TRUE;

    /* Establecemos la nueva configuracion */
    if(!SetCommState(h, &dcb))
    {
        /* Error al configurar el puerto */
    }

    DWORD n;
    char enviar; //poner abajo
    int recibido;

    /* Para que WaitCommEvent espere el evento RXCHAR */
    SetCommMask(h, EV_RXCHAR);
    while(1)
    {
        recibido=0;
        /* Enviamos... */

        /* De la llamada a WaitCommEvent solo se retorna cuando ocurra51.
        // WaitCommEvent(h, &dwEventMask, NULL);
        /* Recibimos algun dato!*/
        while(1)
        {
            ReadFile(h, &recibido, /* leemos un byte */, &n, NULL);
            if(!n)
                break;
            else
            {
                if(flagcom!=0)
                    flagcom++;

                if((recibido==0xAA)&&(flagcom==0))
                {
                    pos=0;
                    flagcom=1;        //recibimos el primer 1byte. que es 0xAA.
                }

                if(flagcom==2)
                {
                    pos=recibido;
                    pos=pos<<8;        //recibe el segundo 2byte y lo junta con
                }

                if(flagcom==3)
                {
                    pos=pos+recibido;
                    y=(signed short int)pos;
                }
            }
        }
    }

```

```

y=esc*y;
e_1=e; //estamos calculando el error
if(t>=5)
r=0;
if(t>=10)
r=-pi_/4;
if(t>=15)
r=0;

//r=(pi_/2)*sin(0.628*t);
e=r-y;
//PID:
proporcional=kp*e;
derivativa=kd*(e-e_1)*iT_s;
if((integral<VNM)&&(integral>(-VNM)))
integral=integral+ki*T_s*e;
else
{
if(integral>=VNM)
integral=0.95*VNM;
if(integral<=(-VNM))
integral=-0.95*VNM;
}
u=proporcional+integral+derivativa;

omega=w*t;
if(omega>=tope_w)
omega = tope_w;
u1=VNM*sin(omega*t);
u2=VNM*sin(omega*t+2.09); //6.28 = 1Hz
//u2=0;
u3=VNM*sin(omega*t-2.09);
//u3=0;

if(u>VNM)
u=VNM;
if(u<-VNM)
u=-VNM;
pwmf1=u1;
pwmf2=u2;
pwmf3=u3;

//escalamiento de salida a 7 bits más 1
pwmf1=escs*pwmf1;
pwm1=(unsigned char)fabs(pwmf1);

if(pwmf1<0)
pwm1=pwm1+128;

pwmf2=escs*pwmf2;
pwm2=(unsigned char)fabs(pwmf2);

if(pwmf2<0)
pwm2=pwm2+128;

pwmf3=escs*pwmf3;
pwm3=(unsigned char)fabs(pwmf3);

if(pwmf3<0)
pwm3=pwm3+128;

```

```

//mandando byte con la señal de control//////////
enviar=0xAA;

if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
{
    /* Error al enviar */
}

enviar=pwm1;

if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
{
    /* Error al enviar */
}

enviar=pwm2;

if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
{
    /* Error al enviar */
}

enviar=pwm3;

if(!WriteFile(h, &enviar/*puntero al buffer*/, 1/* 1 byte*/, &n, NULL))
{
    /* Error al enviar */
}
////////////////////////////////////

//Imprimiendo en pantalla
printf("%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\n",t,r,y,u1,u2,u3,e,omega);

/*escribir algunos datos en el archivo*/
fprintf(fp,"%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\t%3.3f\n",t,r,y,u1,u2,u3,e);
flagcom=0;
t=t+Ts;

}
//cierre del else
//printf("%c",recibido);
//cout << recibido; /* mostramos en pantalla */
} //CIERRE WHILE()
} //CIERRE WHILE()
fclose(fp);
return 0;
}

```

A.7. Código de recepción de datos por el PIC18f4431.

```
#include<18f4431.h>
#device adc=10 //manejar adc de 10 bits
#include<stdlib.h>
#include<math.h>
#fuses HS,NOWDT,PUT,NOBROWNOUT,NOLVP,NOWRT,NOPROTECT,NOCPD
#use delay(clock=2000000) //Base de tiempo para retardos (frecuencia del Xtal)
#use rs232(baud=115200,XMIT=PIN_C6,RCV=PIN_C7,BITS=8,PARITY=N)//Config. P. Serie
//direcciones de los puertos y algunos registros
#byte porta = 0xf80 //direcciones de los puertos
#byte portb = 0xf81
#byte portc = 0xf82
#byte portd = 0xf83
#byte porte = 0xf84
#byte TMR0H = 0xfd7
#byte TMR0L = 0xfd6

#byte T0CON = 0xfd5
#byte INTCON= 0xff2
#byte ADCON1= 0xfc1
#byte ANSEL0= 0xfb8
#byte ANSEL1= 0xfb9

#byte TMR5H=0xF88 //Conteo de Encoder Parte alta
#byte TMR5L=0xF87 //Conteo de Encoder Parte Baja
#byte QEICON=0xFb6 //Registro de Configuración de Módulo de Cuadratura
#byte T5CON=0xFB7 //Registro de configuración de TIMER 5
#byte POSCNTL=0xF66 //CAP2BUFL (registro de cuentas parte baja)
#byte POSCNTH=0xF67 //CAP2BUFH (registro de cuentas parte alta)
#byte VREGH=0xF68 //CAP1BUFL Registro de Velocidad Parte Baja
#byte VREGH=0xF69 //CAP1BUFH Registro de Velocidad Parte Alta
#byte CAP1CON=0xF63 //Registro configuracion para reset de base de tiempo de captura
#byte PIE3=0xFA3

#bit PC0 = 0xf82.0
#bit PC1 = 0xf82.1
#bit PC2 = 0xf82.2
#bit PC3 = 0xf82.3
#bit PC4 = 0xf82.4

#bit PD0 = 0xf83.0
#bit PD1 = 0xf83.1
#bit PD2 = 0xf83.2
#bit PD3 = 0xf83.3
#bit PD4 = 0xf83.4
#bit PD5 = 0xf83.5
//#bit VCFG1=0xfc1.7
//#bit VCFG0=0xfc1.6
//#bit INTCON2_7=0xff1.7
```

```

//-----Declaracion de variables-----
int16 inter,posP,cuenta;
int16 pwm_a,pwm_b,pwm_c;
int8 posPH,posPL,puerto,AB,AB_1,aux;
int8 tope,dato;
int16 pwm1,pwm2,pwm3;
int8 cuentaH,cuentaL;

int8 flagcom=0;

int16 cte=(1023/127)*4;

//-----Rutina de interrupción-----
#int_rb
void rb_isr()
{
    puerto=PORTB;
    AB=((puerto)&(0x30))>>4;
    aux=AB^AB_1;
    if(aux!=0)
        if(aux!=3)
            if(((AB_1<<1)^AB)&(0x02))
                posP--;
            else
                posP++;
    AB_1=AB;
}

//-----Programa principal-----
void main(void)
{
    set_tris_a(0b11111111);
    set_tris_b(0b11111111);
    set_tris_c(0b10000000);
    set_tris_d(0b00001100);
    set_tris_e(0b11111111);
    // Configurando lectura del encoder
    QEICON=QEICON | (0b00010101);
    QEICON=QEICON & (0b01110101);
    T5CON=T5CON | (0b00011001);
    T5CON=T5CON & (0b10011101);
    CAP1CON=CAP1CON | (0b01001111);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_8);
    PORTC=0;
    T0CON=0xC7; //prescaler asignado a timer0 con relación 1:256
    TMR5L=0;
    TMR5H=0;
    POSCNTL=0;
    POSCNTH=0;
    VREGH=0;
    VREGL=0;
    /*Configurando el ADC*/
    setup_port_a(sAN0); //setup_adc_ports( ALL_ANALOG );
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL ); //Configurando el convertidor ADC con reloj interno
    set_adc_channel(0);
    delay_us(15);
}

```

```

//configurando pwm
//setup_power_pwm(PWM_CLOCK_DIV_4| PWM_FREE_RUN| PWM_DEAD_CLOCK_DIV_2,1,0,255,0,1,0);
//setup_power_pwm(modes, postscale, time_base, period, compare, compare_postscale, dead_time)
setup_power_pwm(pwm_free_run, 1,0, .0000512, 255, 1, 0);
setup_power_pwm_pins(pwm_odd_on, pwm_odd_on, pwm_odd_on, pwm_odd_on);

setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_ccp2(CCP_PWM); //linea nueva
setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,255,1); //T=(1/clock)*4*t2div*(period+1)

TMR0L=0;
set_pwm1_duty(0);
set_pwm2_duty(0); //linea nueva
AB=0;
AB_1=0;

if(PD2)
    tope=196;
else
    tope=98;

// tope=196;

enable_interrupts(global);
enable_interrupts(int_rb);
//INTCON2_7=0; //pull-ups habilitados
PC0=1;
while(TRUE)
{

    inter=(posP)&(0xFF00);
    posPH=inter>>8;
    posPL=(posP)&(0x00FF);

    PD4=1; //inicia envío
    putc(0xAA); //mandando dato de reconocimiento al puerto serial
    //putc(posPH); //mandando cuenta al puerto serial
    //putc(posPL);
    putc(POSCNTH);
    putc(POSCNTL);

    // PC4=0; //termina envío
    //PD5=1; //inicia espera del timer
    do
    {
        if(kbhit())
        {
            dato=getc();

            if(flagcom!=0) //vamos a mandar tres datos identificador
                flagcom++;
        }
    }
}

```

```

if((dato==0xAA)&&(flagcom==0))
{
    flagcom=1;
}

if(flagcom==2)    //aqui recibimos pwm1
{

    if(dato>=128)
    {
        PD0=0;
        PC1=1;
        dato=dato-128;
        pwm1=dato<<1;
    }
    else
    {
        PD0=1;
        PC1=0;
        pwm1=dato<<1;
    }
    pwm_a=pwm1*cte;
}

    if(flagcom==3)//aqui recibimos pwm2
    {

        if(dato>=128)
        {
            PD1=0;
            PD4=1;
            dato=dato-128;
            pwm2=dato<<1;
        }
        else
        {
            PD1=1;
            PD4=0;
            pwm2=dato<<1;
        }
        pwm_b=pwm2*cte;
    }

    if(flagcom==4)    //
    {

        if(dato>=128)
        {
            PC4=0;
            PD5=1;
            dato=dato-128;
            pwm3=dato<<1;
        }
        else
        ,

```

```

        {
            PD1=1;
            PD4=0;
            pwm2=dato<<1;
        }
        pwm_b=pwm2*cte;
    }

    if(flagcom==4)                //aquí recibimos pwm3
    {
        if(dato>=128)
        {
            PC4=0;
            PD5=1;
            dato=dato-128;
            pwm3=dato<<1;
        }
        else
        {
            PC4=1;    //PD4
            PD5=0;    //PD5
            pwm3=dato<<1;
        }
        pwm_c=pwm3*cte;
        flagcom=0;
    }

    '/ set_pwm1_duty(pwm1);    //actualizando el valor del pwm
    //set_pwm2_duty(pwm2);    //actualizando el valor del pwm

    set_power_pwm0_duty(pwm_a); //por ser odd pondremos el
    set_power_pwm2_duty(pwm_b);
    set_power_pwm4_duty(pwm_c);

    }

    }
    while(TMR0L<ctope);    //cada cuenta vale (4/FXtal)*256 seg
    //PD5=0;                //termina espera del timer
    TMR0L=0;
    }                        //cierre del while infinito
}

```

B. PRODUCTOS GENERADOS.

B.1. Portada de la revista Aristas.

En la Figura B.1 se observa la portada de la revista indexada Aristas, de la Universidad Autónoma de Baja California. En esta revista se publicó el artículo *Review of recent advances of four refrigeration cycles*, generado a partir de la revisión de literatura realizada. Presentado también en el Congreso Internacional de Investigación CI2T 2019 de dicha institución. En la Figura B.2 se señala un fragmento de la primera página del segundo producto generado, el cual fue un artículo publicado en memorias de congreso del CONIIN UAQ 2019. En el cual se mostró la primera parte de la etapa de potencia de este trabajo.

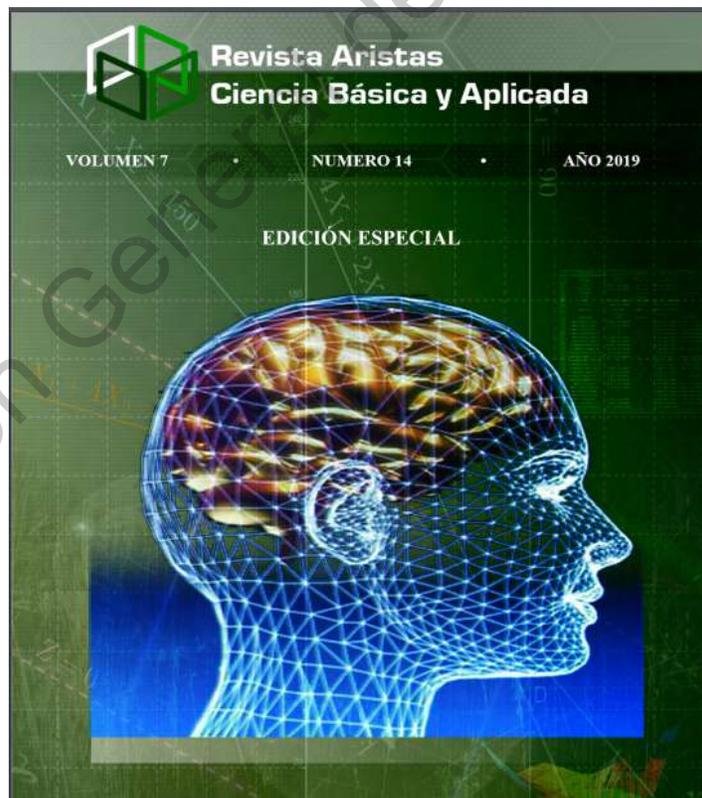


Figura B.1: Portada de la Revista Aristas Volumen 7, año 2019.

B.2. Artículo CONIIN UAQ 2019.



Operation of a 0.4kW PMSM with 3 H-bridges and a 12VDC bus

Marco Antonio Gómez-Guzmán (*Author*)
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
mgomez53@alumnos.uaq.mx

Edson Eduardo Cruz-Miguel (*Co-author*)
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
ecruz30@alumnos.uaq.mx

Dr. Roberto Valentin Carrillo-Serrano (*Co-author*)
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
roberto.carrillo@uaq.mx

Abstract— The present document presents the operation of a three-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM) by three IBT-2 H bridges. The system consists first of all of a serial communication using the C++ programming language, which by serial port sends out three out-of-phase sine waves each at 120°, to the next stage of the system which is a card with a PIC18f4431, which is the one that receives the sine waves sent through the serial port and which therefore gives a sequence of this form to send

performance. We can find in [1] a study where they used a PMSM motor of permanent magnets mounted on the surface of a rotor and three-phase stator windings, which were sinusoidally distributed and displaced 120°. This was to achieve a current control which ensured that the measured stator currents accurately followed the required values and shortened the transient interval as much as possible. Because as

Figura B.2: Portada del artículo publicado en el CONIIN UAQ 2019.