

**METODOLOGÍA PARA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN
NEVERAS SIN ESCARCHA CON LA AYUDA DE UN PROGRAMA DE
SIMULACIÓN**

JUAN CARLOS OSPINA OSPINA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDELLÍN

2014

**METODOLOGÍA PARA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN
NEVERAS SIN ESCARCHA CON LA AYUDA DE UN PROGRAMA DE
SIMULACIÓN**

JUAN CARLOS OSPINA OSPINA

**Trabajo de grado Para Optar por el Título de ESPECIALISTA EN
MODELAMIENTO, SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS
TÉRMICOS.**

Director:

I.M. CÉSAR ALEJANDRO ISAZA ROLDAN Ph.D.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDELLÍN

2014

Julio de 2014

Juan Carlos Ospina O.

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada

Firma

Nota de aceptación

Jurado

Medellín, Julio de 2014

Agradecimientos

Agradezco a Natalia, a mi madre, a mi padre y mis hermanos por su apoyo constante y motivación para seguir adelante.

A industrias Haceb y a las personas que laboran allí en especial a Mario Alejandro, John Henao e Ignacio Rodríguez.

A la universidad Pontificia Bolivariana, a sus profesores en especial a Cesar Isaza y Cesar Nieto, a las personas que laboran en el laboratorio Santiago del Rio y Herman David.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	XI
CAPITULO 1. GENERALIDADES	1
1.1 Consumo de Energía en neveras.....	1
1.2 Tecnologías para la reducción del consumo de energía.	1
1.3 Evaluación de desempeño de la nevera.....	2
1.3.1 Pruebas y ensayos experimentales.....	3
1.3.2 Prueba para determinar zona de mayor temperatura en la nevera.	3
1.3.3 Prueba de clasificación según NTC 5891 [1].	4
1.3.4 Prueba de consumo según NTC 5891 [1].	4
1.3.5 Simulaciones.	6
CAPITULO 2. MODELO DE SIMULACIÓN	7
2.1 Descripción del refrigerador.	7
2.2 Dinámica de fluidos computacionales CFD.....	8
CAPITULO 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES	11
3.1 Prueba de Pull Down.....	11
3.2 Curva del ventilador.....	12
CAPITULO 4. METODOLOGÍA	13
4.1 Tablas de compresor.	13
4.2 El periodo de trabajo.	13
4.3 Temperatura del aire a la entrada.....	14
4.4 Pérdidas de calor atreves de paredes.....	14
4.5 Sólidos de la geometría de la nevera usados en la simulación.....	16
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	18
5.1 Simulación para las diferentes configuraciones.	18
5.2 Selección del compresor.....	20
CAPITULO 6. CONCLUSIONES.....	23
BIBLIOGRAFÍA	24

ANEXOS	26
Anexo I. Pull Down a 32°C.....	26
Anexo II. Curvas y Ecuaciones de Motoventilador	28
Anexo IV. Propiedades Térmicas Paquete de Ensayo.....	34

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1	Nevera cargada con paquetes en el congelador.....	5
Figura 2	Configuración problema CFD.....	8
Figura 3	Ecuación de transporte para la propiedad \emptyset	9
Figura 4	Imagen del mallado del congelador de la nevera.....	9
Figura 5	Curvas de motoventilador.....	12
Figura 6	Cierre del congelador de la nevera.....	16
Figura 7	Parte delantera y trasera del Solido 1.....	17
Figura 8	Parte delantera y trasera del Solido 2.....	17
Figura 9	Turbulence Eddy Dissipation.....	23

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1	Dimensiones y peso de los paquetes de ensayo	IX
Tabla 2	Características funcionales y geométricas de la nevera utilizada como modelo en la simulación.....	7
Tabla 3	Parámetros geométricos y térmicos	18
Tabla 4	Resultados de la simulación.....	19
Tabla 5	Cálculos obtenidos con la simulación.....	20
Tabla 6	Selección del compresor.....	20
Tabla 7	Resultados de consumo.....	21

GLOSARIO [1].

Definición de la terminología utilizada en el texto.

Nevera: Artefacto refrigerador de uso doméstico que combina un espacio de congelación y un espacio de refrigeración.

Nevera sin escarcha / Nevera No frost: Artefacto refrigerador y/o refrigerador congelador sin escarcha con compartimiento de baja temperatura montado en la parte superior y descongelación automática (sin escarcha). Pueden tener controles separados para el congelador y compartimiento de alimentos frescos. Puede tener servicio de hielo y/o agua solo por control mecánico y no eléctrico a través de la puerta, incluye todos los refrigeradores con descongelación automática.

Nevera convencional / Nevera frost: Refrigerador con compartimiento de baja temperatura montado interiormente, en el cual, la superficie refrigerada encierra parcialmente el compartimiento de baja temperatura. Tanto el enfriamiento del compartimiento de alimentos frescos como el compartimiento de baja temperatura se realizan por convección natural. Requiere descongelación manual (la acción de descongelación puede terminarse automáticamente). Control simple.

Compartimiento "una estrella": Compartimiento en el cual la temperatura de almacenamiento medida de acuerdo al numeral 13 de la NTC5891, no excede de -6°C.

Compartimiento "dos estrellas": Compartimiento en el cual la temperatura de almacenamiento medida de acuerdo al numeral 13 de la NTC5891, no excede de -12°C.

Compartimiento "tres estrellas": Compartimiento en el cual la temperatura de almacenamiento medida de acuerdo al numeral 13 de la NTC5891, no excede de -18°C.

Clasificación climática tropical (T): Artefacto de refrigeración diseñado para trabajar en un rango de temperaturas ambiente de 16°C a 43°C.

Consumo de energía: Consumo de energía durante un periodo de 24h, trabajando bajo condiciones estables de operación a una temperatura ambiente de 32°C para artefactos clasificación tropical (T) cargada con paquetes de ensayo según la NTC5891.

Paquete de ensayo: Paquetes paralelepípedos de composición química definida que posee las características térmicas que se dan en el Anexo IV y pueden variar su tamaño y peso de acuerdo a lo que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Dimensiones y peso de los paquetes de ensayo [1].

Dimensiones (mm)	Masa (g)
25x50x100	125
50x100x100	500
50x100x100	1000

Paquete "M": Paquete de ensayo equipado con una termocupla en su centro geométrico.

Conservador: Nombre que se da al compartimiento de refrigeración en el que se dan temperaturas de conservación de 0 °C a 10 °C.

Retornos: Ductos y entradas por donde el aire regresa al evaporador por efecto de la baja de presión generada por la succión del motoventilador después de intercambiar calor con la carga térmica.

Cierre Magnético: Elemento plástico que en su interior soporta una ferrita imantada que se usa para garantizar la hermeticidad entre el gabinete y las puertas de la nevera.

Poliuretano: Se conoce comercialmente como la espuma rígida de poliuretano y se forma por la reacción química de dos compuestos, un poliol y un isocianato, en una formulación que permite diferentes variaciones o aditivos dependiendo de su uso. En las neveras se utiliza principalmente para garantizar el aislamiento térmico y se debe inyectar en molde cerrado que garantice una densidad final para lograr las condiciones de aislamiento deseadas.

RESUMEN

La presente monografía es una metodología que se centra en dar respuesta a algunos de los interrogantes que se presentan en la etapa de diseño de las neveras sin escarcha, en lo relacionado con la obtención del consumo energético.

Para su desarrollo y mejor entendimiento se dividió en seis capítulos que inician con las generalidades en el capítulo 1 y terminan con las conclusiones en el capítulo 6.

El capítulo de generalidades se hizo un cubrimiento de todos los elementos necesarios para entender y realizar la metodología y se describió la prueba de consumo normativa que se hace a las neveras para obtener el valor de consumo.

En el capítulo dos, Modelo de Simulación se hizo una descripción de la nevera cuya geometría sirvió de base para realizar la simulación; adicional se revisó las bases teóricas en las cuales se fundamenta los programas utilizados para CFD (Dinámica de Fluidos Computacionales).

Para encontrar las condiciones de frontera que se utilizaron en la simulación, fue necesario realizar pruebas experimentales cuyos resultados se presentaron en el capítulo tres. Algunos de los resultados de estas pruebas, fueron referenciados en otros estudios experimentales [2].

La metodología que se presentó en el capítulo cuatro, recogió otros elementos que son necesarios para hacer los datos de consumo, como son las tablas de compresores, de las cuales se obtienen los datos de potencia instantánea del compresor.

Con todos los elementos desarrollados hasta ahora, se fundamentaron los resultados que se presentan en el capítulo cinco. Dichos resultados mostraron que la metodología descrita, si cumplió con el objetivo.

Para finalizar las conclusiones presentadas en el capítulo seis, remarcan el hecho de que la metodología implementada si cumplió con los objetivos propuestos.

PALABRAS CLAVES

Consumo energético, Simulación, Metodología, Diseño funcional, Nevera, Pull Down, Prueba de consumo, Normatividad.

INTRODUCCIÓN

El diseño funcional de un refrigerador combinado doméstico (Nevera), se puede abordar y desarrollar de diversas maneras dependiendo del tiempo, la tecnología y experticia que se tenga en el área de desarrollo. En las áreas de desarrollo de producto en refrigeración de las empresas metalmecánicas ensambladoras de electrodomésticos, se utilizan múltiples herramientas para el desarrollo funcional, estas herramientas pueden ir desde pruebas de ensayo y error en prototipos, hasta complejas simulaciones en programas de CFD.

Si revisamos que dificultades se encuentran, cuando se quiere realizar una evaluación previa por ensayo y error, hallamos que en las primeras etapas de diseño de producto es costoso contar con prototipos debido a que su fabricación se debe realizar manualmente, las piezas plásticas inyectadas no se pueden elaborar de esta forma debido a que todavía no existe el molde y las termoformadas son fabricadas con moldes muy artesanales, adicional el poliuretano del prototipo no es inyectado en una prensa que garantice la densidad de empaque para lograr su mejor aislamiento.

Si se intentan cambiar todos estos limitantes que se tienen para realizar un prototipo apropiado con características funcionales similares a las del producto final, se deberían realizar muchas inversiones lo que convierte los prototipos en piezas costosas y rígidas que permiten realizar cambios a su diseño inicial con una inversión alta de tiempo y dinero.

Todo lo anterior se dificulta aún más si lo que se quiere estimar con el prototipo es una prueba de consumo energético que arroje un valor comparable al que se obtendrá en la nevera cuando se produzca en serie.

La otra forma para obtener un valor de consumo energético es hacer uso de un CFD con el cual se pueden simular diversas geometrías y estimar que mejoras en las temperaturas internas se pueden obtener al realizar los cambios en la geometría.

La metodología que se presenta a continuación para estimar el consumo energético de la nevera, con la cual se podrían evaluar diferentes cambios en su geometría y en la cantidad de aire que circula en está variando el motoventilador; tiene su base en una experiencia laboral de once años en el departamento de diseño funcional de industrias Haceb y en las bases teóricas adquiridas en el área térmica durante el pregrado y la especialización de ingeniería. De esta forma se podrá predecir si una propuesta de diseño tiene un consumo energético menor o mayor con respecto a otra, apoyándose de diferentes elementos como son: una herramienta de simulación que en este caso es el FLUENT®, las fichas técnicas del

compresor, tablas de motoventiladores y de datos experimentales realizados en la nevera con la cual se quieren hacer los ensayos de validación de la metodología.

OBJETIVOS

Objetivo General.

Proponer una metodología del uso del programa de simulación FLUENT® para evaluar efectos de la variación del caudal de aire en la nevera vía cambios en las RPM del motoventilador y geometrías de ductos de aire con el fin de predecir el consumo energético en neveras No Frost.

Objetivos Específicos.

- Conocer el manejo del software de simulación FLUENT® en la parte de simulación en estado estable.
- Determinar cuáles deben de ser los datos de entrada y las condiciones de frontera para realizar la simulación.
- Realizar prueba de la metodología diseñada comparando los cálculos de consumo energético calculados con los datos arrojados por la simulación.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1 Consumo de Energía en neveras.

Según estudios realizados por la UPME en el 2006 con miras a la chatarrización de neveras para la eliminación de los CFC como refrigerante, se estimó que las neveras en Colombia son responsables de alrededor de entre el 20 y 50% del consumo energético de los hogares de los estratos 1, 2 y 3 para las cuatro ciudades con mayor concentración de población del país. La cifra disponible respecto al consumo eléctrico de neveras respecto al consumo eléctrico total residencial, según el último balance energético disponible, es del 22% [4].

En este mismo estudio revela que cambiando dos millones de neveras de las existentes en el país por neveras que consuman un 25% menos de energía se tendría un ahorro del orden del 0.8% sobre el consumo final total de electricidad. Si en el mercado se comercializan neveras con consumos energéticos cada vez menores a la larga se obtendrá una disminución importante en el consumo energético total del país.

Si bien la reducción de energía en la nevera es importante esto también debe de ir acompañado de un uso adecuado por parte del usuario y por políticas gubernamentales que exijan que los productos a comercializar sean cada vez más eficientes. Un ejemplo de ello son las normas de consumo energético que cada vez elevan más sus estándares como es el caso de las normas europeas que clasifican sus equipos hasta "A+++" [5]. Como ejemplo se puede estimar que una nevera rotulada con "A++" consume un 28% menos que una nevera de características similares y con clasificación energética "A" [6].

Cuando se realiza una prueba normativa de consumo de energía sobre una nevera sin escarcha el consumo de energía eléctrica lo realizan tres de sus componentes que son: compresor, resistencia de descongelación y motoventiladores que pueden ubicarse en el evaporador y el condensador de la nevera. A estos elementos se pueden sumar en algunos modelos las resistencias anticondensación. El consumo energético del compresor y del motoventilador está ligado a sus tiempos de trabajo que a su vez están determinados por las temperaturas que se quieren alcanzar y por las ganancias de calor que tiene la nevera a través de sus paredes, puertas y cierres magnéticos.

1.2 Tecnologías para la reducción del consumo de energía.

La reducción del consumo energético se puede atacar desde diferentes frentes como son:

- Colocar compresores de alta eficiencia de última generación [7].
- Aumentar el espesor y las características del material aislante [8].
- Paneles de vacío para aislamiento térmico.
- Optimización de la carga de refrigerante y longitud de capilar [9].
- Optimización de los flujos de aire por medio de ventiladores de bajo consumo energético [10].
- Predicción del consumo a partir de cálculos numéricos basados en las ecuaciones gobernantes de los elementos que conforman el sistema de refrigeración [2].
- Optimización del consumo energético a partir de mejoras geométricas en la nevera [11].

Las mejoras en la geometría de los ductos de aire en la nevera y optimización de las áreas por donde circula para hacer un mejor uso de este, es una buena manera de mejorar el consumo energético [11]. La optimización de los flujos de aire se puede dar en el diseño inicial del producto o en las etapas de mejoramiento posteriores.

Después de intervenir en el mejoramiento del flujo de aire, cualquier otra reducción adicional en el consumo por un requisito gubernamental o una estrategia de mercado se debe realizar por cambio de un componente, lo que puede traer consigo un aumento en el precio de fabricación de la nevera.

1.3 Evaluación de desempeño de la nevera.

El consumo de energía eléctrica de un país se puede dividir en consumo eléctrico a nivel industrial y residencial. En el nivel residencial para totalizar el gasto de energía se debe tener en cuenta todos los hogares y sus electrodomésticos, incluyendo la nevera [2-12].

Por esta razón las políticas gubernamentales encaminadas al uso racional de la energía exigen medir los consumos y eficiencias que presentan las neveras y en algunos casos regular su valor. [1-13].

Para calcular la eficiencia cada país adopta sus curvas características y asigna una letra que va desde de la "A" a la "G", siendo la "A" la de menor consumo y la "G" la de mayor consumo. [14-15-16].

Otras normas de eficiencia energética asignan un índice que se calcula de acuerdo a las características de la nevera y el valor de la eficiencia se presenta como un porcentaje sobre este valor [17].

Cuando se revisa la normatividad en lo referente a la medición del consumo muchas de las normas son basadas en la IEC62552:2007. Y para el cálculo de la eficiencia energética se encuentra otra norma propia del país que asigna una clasificación de acuerdo al valor medido. Algunas de estas normas que hacen la clasificación se basan en la norma COPANT.

Para el caso colombiano se utilizan las normas NTC5891 basada en la IEC para medir el consumo y la NTC5020 para su clasificación energética.

1.3.1 Pruebas y ensayos experimentales.

En el diseño de neveras en las etapas de validación se deben de realizar diversas pruebas con prototipos que todavía no están fabricados con los debidos herramientas, esto genera dificultades y aumenta el margen de error de los resultados.

Antes de la prueba de consumo energético, el prototipo se debe balancear por medio de una prueba de Pull Down, con esta se determinará como está funcionando el sistema de refrigeración de la nevera y si es necesario cambiar alguno de los elementos del sistema para alcanzar los objetivos propuestos.

Teniendo balanceado el sistema se realiza la prueba de almacenamiento según la NTC5891, con esta prueba se clasifica la nevera para una determinada clase climática y una temperatura interna.

Finalizadas estas pruebas en las cuales el prototipo inicial pudo haber sufrido varios cambios debido a que no se tienen buenos resultados en los primeros ensayos, se realizó la prueba de consumo de energía que es determinante de acuerdo a los requisitos del diseño, un valor de consumo que no esté acorde con lo esperado ameritara realizar un rediseño y realizar nuevamente todas las pruebas. Este procedimiento requiere de muchas inversiones de tiempo y dinero si se quieren tener resultados positivos con poco margen de error.

1.3.2 Prueba para determinar zona de mayor temperatura en la nevera.

La prueba de almacenamiento y consumo de la nevera basada en las normas NTC, exigen el conocimiento de la zona del congelador de la nevera donde se reportan las temperaturas más altas. Conociendo esta zona se coloca en ella un paquete M, el cual indicará en qué momento la temperatura de la nevera se encuentra en el límite superior que permite la norma. En detalle, en el volumen del congelador de la nevera pueden existir en un momento dado temperaturas inferiores a las de clasificación, pero en ningún lugar de la nevera existirán temperaturas por encima

del límite superior a las que reportara el paquete M colocado en la zona de mayor temperatura.

La forma en que se determina esta zona, es colocando paquetes M dentro de la nevera en diversos sitios del congelador y se inicia el funcionamiento de la nevera hasta que alcance ciclos de funcionamiento constante, este mismo procedimiento se repite hasta que todos los paquetes M hayan estado por todo el volumen del congelador de la nevera. Con los datos arrojados por estos ensayos, se determinara en qué lugar se deben colocar los paquetes M, para las pruebas de clasificación y consumo.

1.3.3 Prueba de clasificación según NTC 5891 [1].

Esta prueba se realiza para determinar cuál es la temperatura interna más alta que puede alcanzar la nevera para una temperatura ambiente dada.

La prueba consiste en colocar la mayor cantidad de paquetes de ensayo de acuerdo a los requerimientos de norma en la nevera y algunos de estos paquetes son paquetes M, los cuales van en los lugares donde se alcanza mayor temperatura. Como resultado de esta prueba, pueden existir neveras con clasificación una, dos y tres estrellas; diseñadas para trabajar en climas N, SN, ST y T.

Por ejemplo, las neveras tipo T con clasificación dos estrellas, están diseñadas para trabajar en temperaturas ambientes que van desde los 16°C hasta los 43°C y las temperaturas más altas en su congelador son -12°C.

1.3.4 Prueba de consumo según NTC5891 [1].

La norma de consumo del Icontec está basada en el estándar IEC62552 y establece los parámetros en los cuales opera la nevera durante la prueba de consumo de energía. Antes de realizar esta prueba se deben llevara a cabo las pruebas descriptas anteriormente.

Para realizar la prueba, la nevera en el compartimiento congelador y en el conservador se debe cargar con paquetes de ensayo, las propiedades térmicas de los paquetes se muestran en el Anexo IV. En el congelador la cantidad de paquetes está limitada por el tamaño del congelador y las condiciones de carga establecidas por norma, en el conservador de la nevera generalmente se colocan tres cilindros de cobre con termocuplas en su interior repartidos a lo alto del gabinete e igualmente distanciados. Los paquetes de ensayo son de composición química, medidas, peso y características térmicas estandarizadas que hacen que la prueba de consumo sea repetible, algunos de los paquetes de ensayo se equipan

con termocuplas en su centro geométrico y se colocaran en los lugares donde el congelador de la nevera presente sus temperaturas más altas.

En la Figura 1 se muestra el congelador de la nevera cargado con paquetes en cantidad y posición de acuerdo a la norma NTC5891. El paquete M donde se reportan las temperaturas más altas se señala en la figura 1, nevera N300L Haceb que se está simulando. Los paquetes de ensayo diferentes del paquete M que se acomodan uno sobre otro se solidifican en un solo bloque, esto facilita la simulación y no tiene influencias en los resultados debido a que no se consideran resistencias de transferencia de calor en los planos de unión de dos paquetes, esto es similar a que los paquetes que se colocan uno sobre otro formen uno solo.

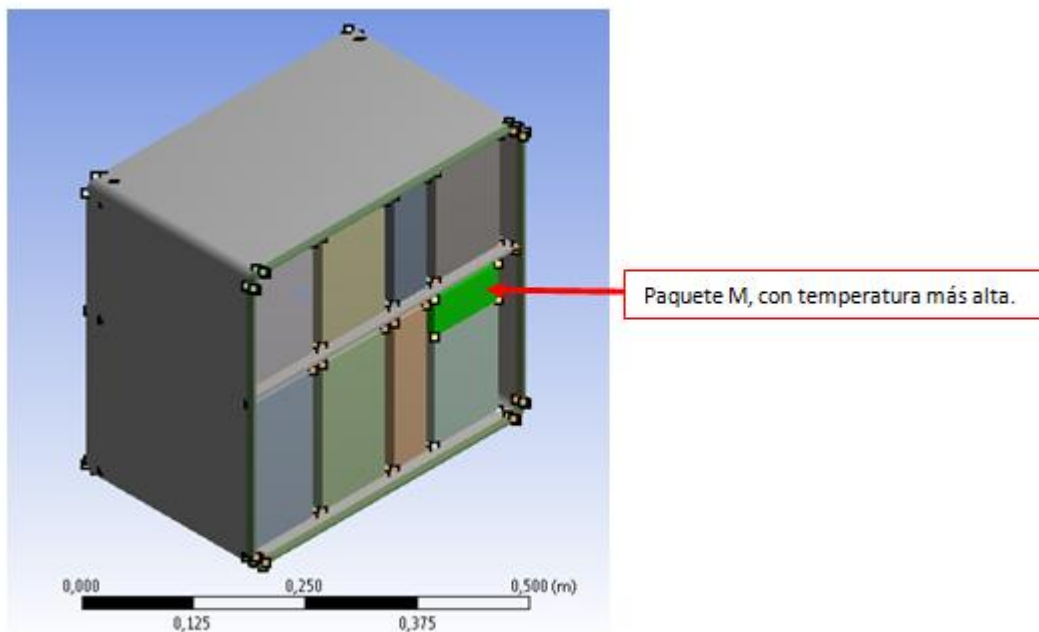


Figura 1 Nevera cargada con paquetes en el congelador.

La temperatura más alta que se presente en el congelador de la nevera, a temperatura ambiente determinara la clasificación de la nevera, de esta manera se podrían tener neveras "tropicales" que pueden operar a temperaturas ambiente hasta 43°C y estas mismas neveras pueden ser de una, dos y tres estrellas. Las estrellas lo que determinan es que el paquete de ensayo con la temperatura más alta (paquete M), puede estar en un valor de temperatura inferior o igual a -6°C y superior a -12°C para ser una estrella, inferior o igual a -12°C y superior a -18°C para ser dos estrellas e inferior o igual a -18°C para ser tres estrellas.

La temperatura ambiente a la cual se realiza el consumo para una nevera tropical es de 32°C y siempre se debe garantizar que el paquete que presente la temperatura más alta en el congelador este igual o inferior a la temperatura correspondiente al número de estrellas de la nevera. Mientras esto se cumple en el congelador de la nevera los cilindros con termocupla en su centro geométrico que se colocan para censar las temperaturas del conservador deben de registrar temperaturas entre 0°C y 8°C y el promedio durante toda la prueba debe de ser igual o inferior a 4°C sin sobre pasar los 0°C. La nevera debe operar en este rango por un periodo igual o superior a las 24h y el valor de consumo obtenido se debe reportar a 24h.

Durante la prueba el compresor de la nevera presentó ciclos de trabajo y descanso, los periodos de trabajo es el tiempo en el cual opera el compresor realizando el ciclo de refrigeración, se enfría la nevera y en el periodo de descanso no trabaja el compresor y se calienta la nevera por causa de la ganancia de calor atreves de las paredes, por esta razón para una nevera dos estrellas el termostato se debe colocar en una posición en la cual la nevera trabaje hasta que el paquete que presente las temperaturas más calientes llegue hasta temperaturas inferiores a -12°C, para que en los periodos de descanso que se calienta la nevera el paquete no sobre pase a los -12°C.

1.3.5 Simulaciones.

Otras alternativas de las que se puede hacer uso para una validación del diseño son las simulaciones numéricas, en estas se realiza un tratamiento matemático del fenómeno físico al cual se enfrenta el prototipo en las pruebas funcionales, para su logro se requiere de un conocimiento previo de los fenómenos físicos que ocurren durante de las pruebas y del manejo de una software de simulación. El uso de las simulaciones puede tener algunas ventajas como son:

- La realización de cambios en el sólido en el cual se hace la simulación son más sencillos de hacer que en un prototipo físico.
- No requiere constantemente del uso de las cabinas climatizadas, hace uso de las cabinas en el momento que se quiere validar un dato de entrada para una condición de frontera.
- La simulación también puede tener algunas desventajas como son:
- La valides de los resultados dependerá de la correcta utilización del modelo físico y los parámetros numéricos.
- Requiere del conocimiento previo de la física que afecta al problema.

CAPITULO 2. MODELO DE SIMULACIÓN

2.1 Descripción del refrigerador.

El modelo de nevera utilizado en la simulación es una N300SE marca Haceb con la siguiente configuración:

Tabla 2. Características funcionales y geométricas de la nevera utilizada como modelo en la simulación.

PARÁMETRO	VALOR
Volumen en el compartimiento congelador [L]	62.59
Volumen en el compartimiento conservador [L]	236.91
Espesor de poliuretano en paredes del congelador [mm]	50
Espesor de poliuretano en paredes del conservador [mm]	35
Condensador	Condensador de convección natural de tubo y aletas en forma de varillas, colocado en el espaldar de la nevera en acero
Evaporador	Evaporador forzado de tubo y aletas en aluminio
Ventilador	Potencia 12 W, 2400 RPM, 115 v, 60 Hz, sentido de giro horario. Aspa ventilante de diámetro 110mm y 4 alabes.
Longitud de capilar [mm]	2500
Diámetro de capilar [mm]	0.71
Compresor	Embraco EMU60CLP , RSIR
Refrigerante	R600a
Sistema de descongelación	Temporizador de 8h x 30min Resistencia de descongelación de potencia 178W Bimetálico apertura 13°C, cierre -2°C
Consumo de energía rotulado	1.7KWh/24h
Clasificación	Dos estrellas
Clasificación climática	Tropical

2.2 Dinámica de fluidos computacionales CFD.

La dinámica de fluidos computacionales (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos para solucionar problemas que involucran fluidos. Los problemas que se resuelven por medio de CFD tienen la configuración que se muestra en la Figura 2.

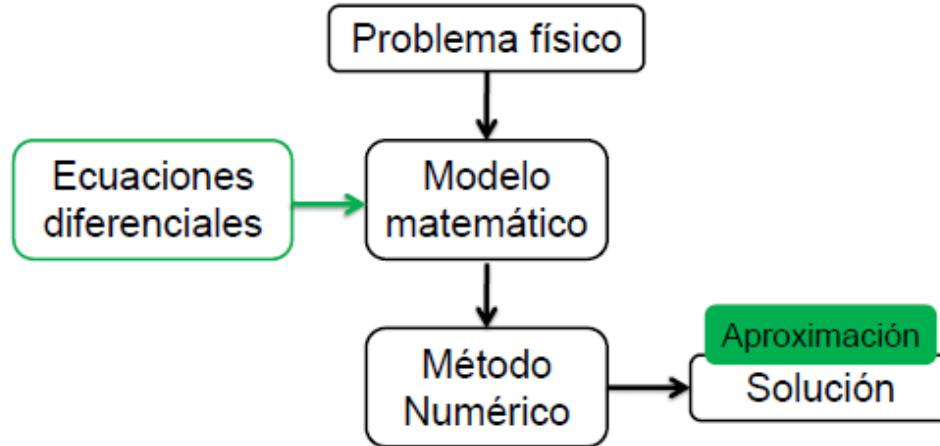


Figura 2 Configuración problema CFD [18].

Problema físico: Este se presenta cuando ocurre un fenómeno material que se puede estudiar por medio del método científico. En la nevera que es el caso de estudio los problemas físicos que se encuentran son el movimiento del aire impulsado por el motoventilador que se desplaza por todo el volumen del congelador de la nevera y la transferencia de calor que existe entre los paquetes con los que se carga el congelador de la nevera y el aire, a una temperatura inferior a estos.

Modelo matemático: Modelo utilizado para describir el problema en forma de ecuaciones diferenciales.

La ecuación de transporte que se puede aplicar a una determinada propiedad como es la masa, la velocidad y la energía, se describe en la figura 3, esta permite obtener las ecuaciones de continuidad, conservación del momento y la conservación de la energía.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S_\phi$$

Tasa de incremento de ϕ en el elemento de fluido	+	Tasa de flujo neto de ϕ hacia fuera del elemento de fluido	=	Tasa de incremento de ϕ debido a la difusión	+	Tasa de incremento de ϕ debido a fuentes
---	---	---	---	---	---	---

$\phi =$	{	1	<i>Ec. continuidad</i>
		u	<i>Ec. momentum x</i>
		v	<i>Ec. momentum y</i>
		w	<i>Ec. momentum z</i>
		i (T o h ₀)	<i>Ec. energía</i>

Figura 3 Ecuación de transporte para la propiedad ϕ [18].

Estas ecuaciones se pueden resolver en un dominio de infinitos puntos, o se pueden reducir a un dominio finito de puntos por medio de un mallado que se realiza en torno a la geometría que se quiere estudiar. Para el caso de estudio la geometría que se malla es el aire, el gabinete y los paquetes de ensayo. Una imagen del mallado se muestra en la figura 4.

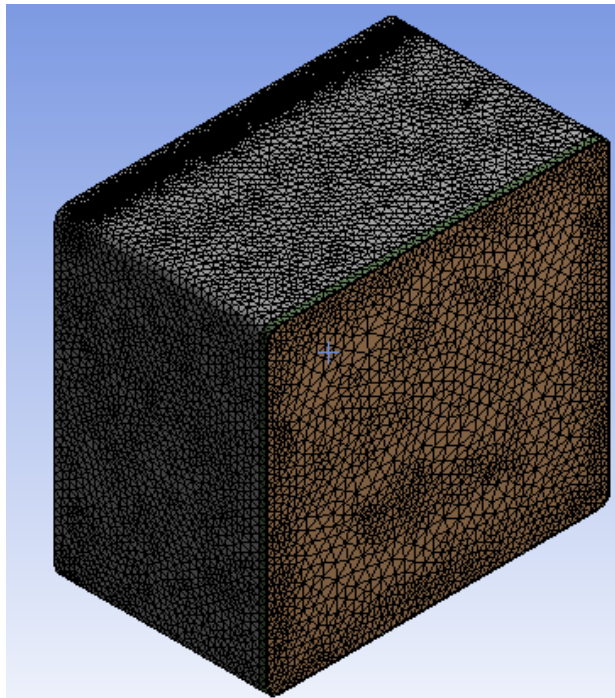


Figura 4 Imagen del mallado del congelador de la nevera.

En la geometría mallada se están uniendo sólidos (gabinete plástico interior de la nevera y la carga de paquetes de ensayo) y fluido (aire). El problema es complejo pero el uso del programa de simulación Fluent® empleado facilita este procedimiento.

Método Numérico: Las ecuaciones diferenciales que se formulan en cada uno de los nodos del mallado se deben convertir en ecuaciones lineales que faciliten su solución, todo este tratamiento matemático genera errores, que la persona encargada de la simulación los debe reducir aumentando el número de nodos y utilizando un adecuado método numérico para resolver el sistema de matrices que se genera. El proceso por el cual las ecuaciones diferenciales se convierten en lineales recibe el nombre de Discretización y existen varios métodos, entre los más conocidos se encuentran [18]:

- Método de Diferencias Finitas (FDM)
- Método de Volúmenes Finitos (FVM)
- Método de Elementos Finitos (FEM)
- Método de Elementos de Frontera (BEM)

El programa Fluent®, utiliza el método de volúmenes finitos (FVM), que consiste en dividir el dominio en volúmenes de control y aplicar un balance de conservación a cada volumen. Con el Fluent®, se facilitan algunos de estos problemas y los comandos de refinamiento de malla pueden reducir los errores que se pueden generar [18].

En algunos casos se debe recurrir a los resultados experimentales para validar que la simulación si representa el modelo físico simulado [18].

CAPITULO 3.PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1 Prueba de Pull Down.

La prueba de Pull Down se lleva a cabo en los laboratorios de refrigeración de neveras cuando se busca balancear el sistema de refrigeración. Con esta prueba se establece como están funcionando los componentes del sistema de refrigeración que serían evaporador, condensador, compresor, intercambiador, elemento de expansión (capilar), aislamiento térmico del gabinete y carga de refrigerante. La interpretación de los resultados nos puede servir para determinar si se debe cambiar alguno de los componentes para que el sistema funcione correctamente o solo se debe cambiar la carga de refrigerante aumentándola o disminuyéndola.

La prueba de Pull Down en términos generales consiste en colocar termocuplas en el circuito de refrigeración (Domo del compresor, salida de compresor, entrada condensador, condensador medio, salida condensador, entrada intercambiador, entrada evaporador, salida de evaporador , succión compresor) y en los centros geométricos del conservador y el congelador de la nevera.

La nevera se deja estabilizar con las puertas abiertas a unas condiciones atmosféricas de 43°C y 80% de humedad relativa. Cuando la nevera alcanza condiciones estables, se cierran las puertas, se energiza el compresor y se deja en funcionamiento por un periodo de 12 horas. Terminado este periodo, se revisa los resultados de estas temperaturas y se analizan.

Para el caso de la presente metodología la prueba nos servirá para determinar cómo cambia la temperatura de evaporación en un modelo específico de nevera con las RPM del motoventilador. Los resultados se obtendrán experimentalmente y se podrá observar que a medida que disminuyan las RPM del motoventilador manteniendo constante los demás componentes del sistema de refrigeración la temperatura de evaporación disminuirá.

Con los datos obtenidos que se muestran en el Anexo I, se podrá dar un valor de temperatura inicial a la entrada del flujo del aire al congelador en la simulación. Estos valores fueron obtenidos para un solo compresor, sin la nevera tener en su interior carga térmica y se varían las RPM del ventilador. Cuando la nevera opera con carga térmica en el congelador como en una prueba de consumo, es necesario aumentar o disminuir los BTU/h del compresor o hacer un cambio en el capilar si se quiere mantener una determinada temperatura de evaporación.

3.2 Curva del ventilador.

El motoventilador (aspa + motor) de acuerdo a sus RPM tiene una ecuación característica de la cual se puede obtener el caudal cuando varía la presión estática (Figura 5). Las curvas características del ventilador se pueden obtener en un banco de ensayos para motoventiladores y las medidas se realizan de acuerdo al estándar ANSI/ASHRAE STANDARD 51-07.

En el momento de comprobar la metodología no se tenía implementado un túnel de ensayo por tal motivo las curvas características de un motoventilador para refrigeración se obtuvieron de una imagen que se muestra en un artículo científico [2].

Con ayuda del programa DIGITIZELT® se obtienen los valores de la imagen donde aparecen las curvas y con estos valores se pudieron calcular los polinomios con ayuda del programa MATLAB®, luego de tener las curvas para determinadas revoluciones por minuto, se interpola para tener las curvas de las RPM que se requieren y luego estos polinomios se corrigen a la temperatura de evaporación (Anexo II). El programa FLUENT® permite colocar los coeficientes del polinomio como una condición de frontera, lo cual permite obtener un caudal dependiendo de la caída de presión en la nevera.

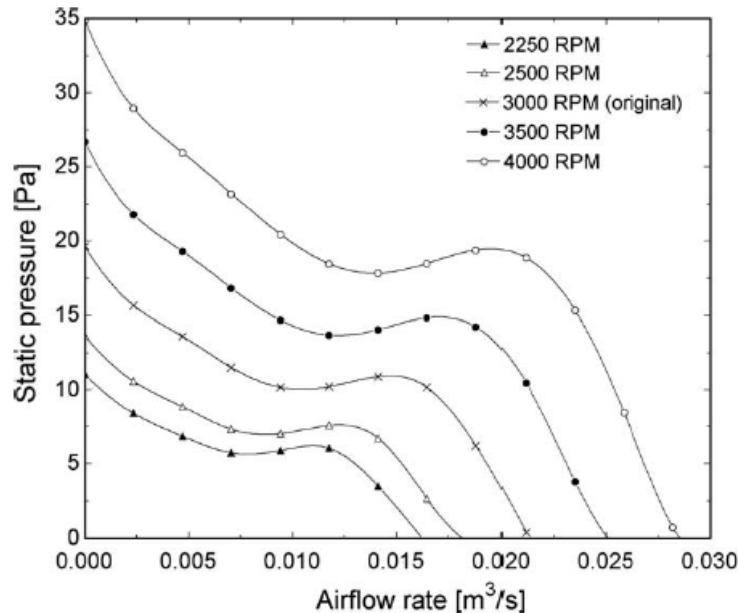


Figura 5 Curvas de motoventilador [2].

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

A continuación se describirá los elementos que requiere la metodología para ser implementada y la manera en que son utilizados los diferentes resultados para las condiciones de frontera de la simulación. Con los resultados obtenidos se calculó el consumo energético con los datos del compresor.

4.1 Tablas de compresor.

Las tablas del compresor son suministradas por el proveedor y muestran como varía la potencia instantánea de este con los cambios en la temperatura de evaporación y condensación de la nevera.

El consumo energético de la nevera se determinó con la potencia y los datos de tiempo de funcionamiento. En el Anexo III se muestran las tablas de funcionamiento de los compresores seleccionados de acuerdo a los resultados de la simulación.

4.2 El periodo de trabajo.

La simulación se realizó en estado estable y los periodos de trabajo y de descanso se determinaron de los resultados de la simulación.

Con las temperaturas de entrada y salida del aire al congelador, el flujo másico del aire y el calor específico del aire se obtiene la ganancia de calor de aire por unidad de tiempo. Este mismo calor se debe retirar en el evaporador y lo debe aportar el compresor. Para el caso de comprobación de la metodología supondremos un intercambio de calor sin pérdidas. Con la potencia requerida del compresor buscamos por tabla que compresor cumple con este requisito y anotamos su EER.

Debido a que el paquete M no puede estar por debajo de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, la nevera en los ciclos de trabajo debe de enfriar el paquete por lo menos hasta $-13,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en los ciclos de descanso lo debe de dejar calentar hasta $-12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con este dato calculamos la energía necesaria para que toda la carga descienda un grado de temperatura y con la potencia del compresor se haya el tiempo de trabajo. Para el cálculo de los tiempos de descanso se toma el mismo calor necesario para calentar la carga un grado y la pérdida de calor a través de las paredes del gabinete y de los cierres magnéticos.

Para este caso de validación se está suponiendo una eficiencia en el intercambio de calor en el evaporador del 100%, no se considera el calor aportado por la resistencia en los ciclos de descongelación.

Un cálculo más exacto amerita considerar todas estas pérdidas pero como se mencionó anteriormente se está realizando un cálculo preliminar que a medida que se utilice se puede ir enriqueciendo de más detalles para hacer un cálculo más exacto.

Adicional se supuso que la carga en su totalidad pierde y gana un grado de temperatura en los ciclos de trabajo y de descanso, en el funcionamiento real la nevera cuando prende y apaga por efecto del termostato todos los paquetes presentan temperaturas diferentes, pero se debe cumplir la condición de que el paquete más caliente se esté desempeñando con lo requerido por la norma.

4.3 Temperatura del aire a la entrada.

La temperatura de entrada del aire al congelador basado en datos medidos, se le asignara un valor de dos grados por encima de la temperatura de evaporación. Esta suposición se puede explicar al revisar los datos de mediciones realizadas en las pruebas de Pulldown. Cuando se reducen las RPM del motoventilador se observa una reducción en la temperatura de evaporación, este dato se haya experimentalmente para el presente trabajo.

4.4 Pérdidas de calor atreves de paredes.

Para el cálculo de pérdidas se tienen en cuenta las siguientes consideraciones [19]:

- Conducción de calor en la dirección ortogonal de las paredes.
- Conducción solo por el material aislante, no se considera la parte metálica ni el plástico, el aislante es poliuretano expandido con cicloisopentano con conductividad térmica = $0,025 \text{ W/mK}$
- Coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación.
 - Superficies externas $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$
 - Superficies internas convección natural $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$
 - Superficies internas convección forzada $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Temperaturas para cálculos.
 - Conservador = 5°C
 - Alrededores = 32°C
- Coeficiente global de transferencia de calor: Se calcula con la formula siguiente [19], despreciando el gabinete metálico y el gabinete plástico.

$$\frac{1}{U * A_{pared}} = \frac{1}{h_{ext} * A_{ext}} + \frac{esp_{poli}}{K_{poli} * A_{poli}} + \frac{1}{h_{int} * A_{int}} \quad [19]$$

Dónde:

- Esp_{poli}:** Espesor de poliuretano.
- U:** Coeficiente global de transferencia de calor.
- A_{pared}:** Áreas de las paredes de la nevera.
- h_{ext}:** Coeficiente de convección externa.
- A_{ext}:** Área externa de la pared de la nevera.
- K_{poli}:** Conductividad térmica del poliuretano.
- A_{poli}:** Área del poliuretano.
- h_{int}:** Coeficiente de convección interna.
- A_{int}:** Área interna de las paredes de la nevera.

Las pérdidas por paredes en el gabinete conservador y en el cierre del conservador. Estos se consideran para el cálculo de la potencia del compresor requerido. Las pérdidas por el cierre son el 13% de la pérdida por gabinete [19].

Gabinete conservador: 55 W

Cierre conservador: 7,15 W

- Flux de calor en el gabinete del congelador y el cierre del congelador, estos valores se utilizan para colocarlos en las condiciones de frontera de la simulación, terminada la simulación se corrigen de acuerdo a las temperaturas que se registran en la pared interna del cierre y en la pared interna del gabinete. Con los nuevos valores de pérdidas en el gabinete congelador y cierre más las pérdidas del conservador se calculan los tiempos de descanso.
- Flux de calor en cierre congelador 73,5 W/m² (En la Figura 6 se muestra el cierre en color verde).
- Flux de calor en gabinete congelador 20,93 W/m².

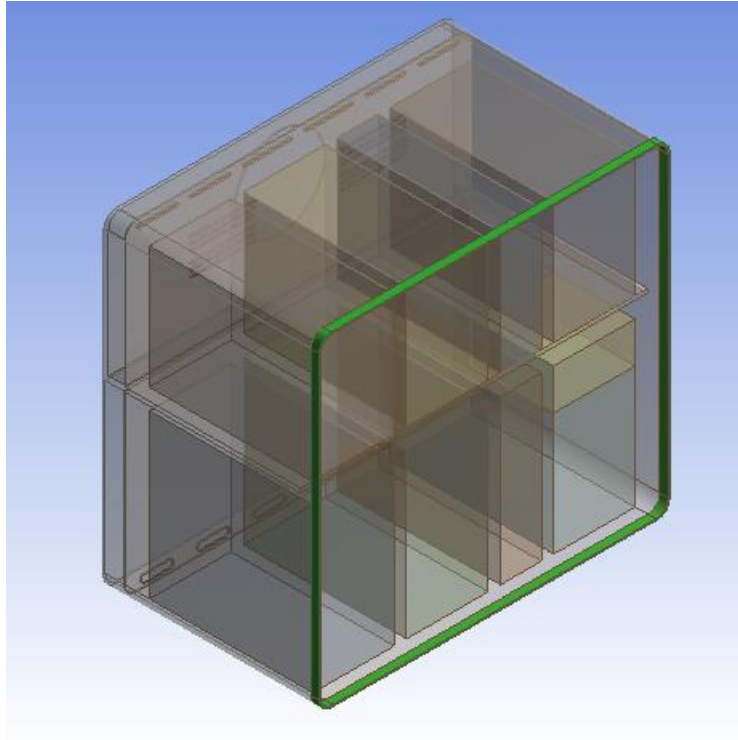


Figura 6 Cierre del congelador de la nevera.

4.5 Sólidos de la geometría de la nevera usados en la simulación.

Para las simulaciones se usaron dos geometrías diferentes que se deben representar en forma de sólidos. En la figura 7 y 8 se muestran los sólidos 1 y 2 que representa el congelador de la nevera cargada con paquetes de ensayo, estas figuras muestran la parte delantera y la parte trasera del congelador de la nevera. En la parte trasera de los sólidos 1 y 2 que aparecen al lado derecho de las figuras se pueden observar los retornos del congelador, el área de la salida del aire (retornos) en el sólido uno tiene un 50% más de área que el sólido dos. En la parte delantera que aparece al lado izquierdo se muestran los paquetes de ensayo y el paquete M.

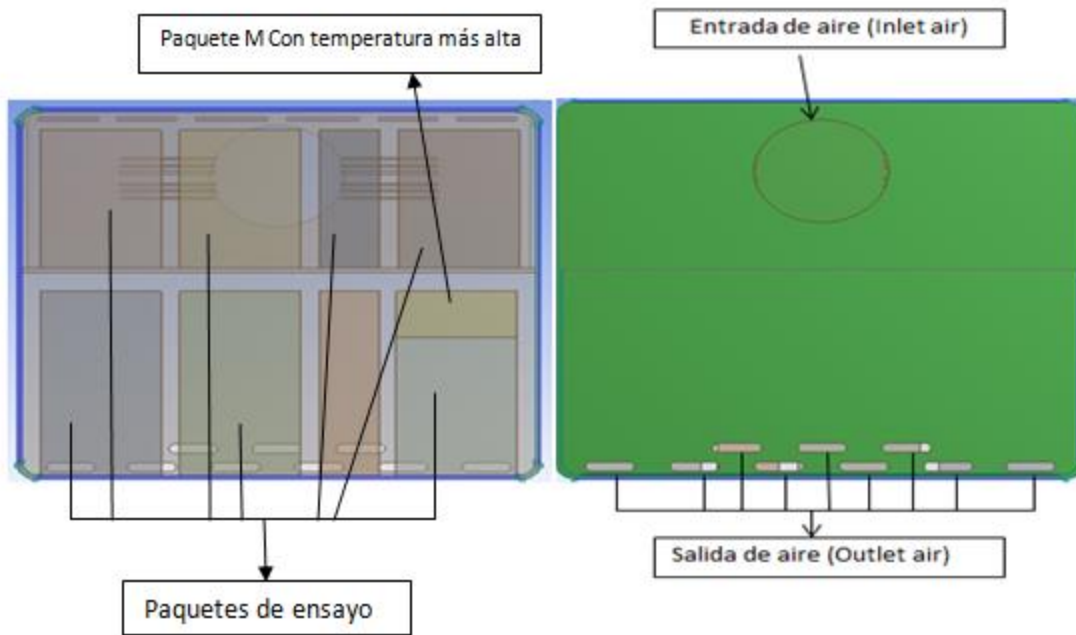


Figura 7 Parte delantera y trasera del Solido 1.

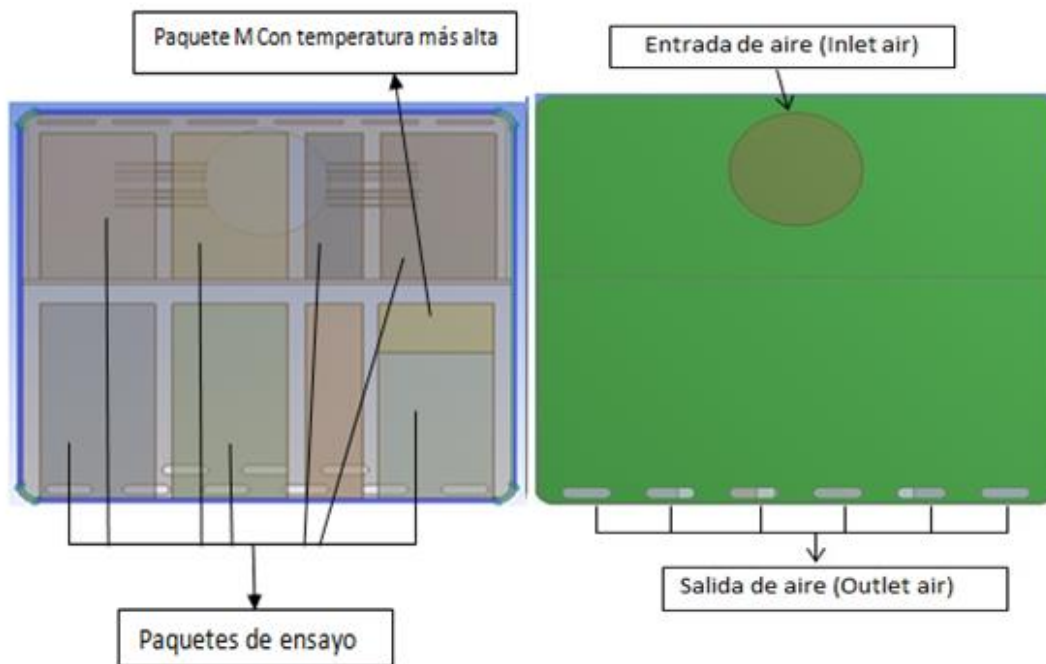


Figura 8 Parte delantera y trasera del Solido 2.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Simulación para las diferentes configuraciones.

Los resultados para las tres simulaciones se presentan en la tabla 4, también se colocan los valores de las propiedades térmicas de los materiales y los valores dimensionales que intervienen en la simulación que se presentan en la tabla 3. Los resultados de los cálculos se presentan en la tabla 5.

Tabla 3. Parámetros geométricos y térmicos.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Área de entrada de aire de motoventilador	0,010	m ²
Cp aire	1006,430	J/kg.K
Área total gabinete congelador exterior en contacto aire	0,443	m ²
h ext	10,000	W/m ² .K
k poliu	0,025	W/m.K
Espesor poliuretano	0,050	m
U	0,476	W/m ² .K
Pérdidas de calor en el gabinete conservador del refrigerador	55	W
Potencia motoventilador	9	W
Pérdidas de calor cierre inferior	7,150	W
Masa paquetes	28	kg
Densidad	1,225	kg/m ³
Cp paquete	2000	J/kg.K

Tabla 4. Resultados de la simulación.

PARÁMETRO	S 1 (3171 RPM)	S 1 (2071 RPM)	S 2 (2071 RPM)	UNIDADES
Velocidad	1,665	1,103	1,057	m/s
T inlet	-26,47	-28,96	-28,96	°C
T outlet pro	-14,11	-19,25	-20,36	°C
T outlet 1	-12,60	-18,60	-19,48	°C
T outlet 2	-9,90	-16,42	-20,69	°C
T outlet 3	-14,89	-21,67	-20,80	°C
T outlet 4	-15,54	-20,16	-19,65	°C
T outlet 5	-14,68	-18,52	-21,95	°C
T outlet 6	-15,49	-18,61	-19,60	°C
T outlet 7	-14,05	-18,82	0	°C
T outlet 8	-13,53	-19,00	0	°C
T outlet 9	-16,27	-21,47	0	°C
T ext	32,00	32,00	32,00	°C
Tpared	-21,66	-27,13	-25,97	°C

En el análisis de los resultados obtenidos en la simulación que se presentan en la tabla 4 para los dos sólidos y los dos ventiladores, se puede observar que lo ideal es tener en el sistema un caudal grande de aire para mejorar la transferencia de calor del aire a los paquetes, este aumento de caudal se puede obtener colocando un ventilador de más RPM o disminuyendo la caída de presión en el sistema por medio de cambios en la geometría, este resultado se puede observar si se revisa en la tabla 4 la geometría 1 y 2 trabajando con un mismo ventilador de 2071 RPM.

La mejora en la transferencia de calor cuando se aumenta el flujo másico se puede observar en los resultados de la tabla 4, cuando se mira el caudal másico y el flujo de calor de las tres simulaciones. Estos dos resultados son directamente proporcionales entre sí y cuando uno aumenta, el segundo también para las tres simulaciones realizadas.

Tabla 5. Cálculos obtenidos con la simulación.

PARÁMETRO	S 1 (3171 RPM)	S 1 (2071 RPM)	S 2 (2071 RPM)	UNIDADES
Flujo másico	0,019	0,013	0,012	kg/s
Flujo de calor	241,168	125,407	106,509	W
Pérdidas de calor en congelador	11,318	12,471	12,226	W
Pérdidas de calor cierre superior	1,691	1,863	1,827	W
Flujo de calor a los paquetes	157,229	40,165	21,544	W
Energía para disminuir un grado	56000	56000	56000	J/K
Tiempo de trabajo	356,168	1394,245	2599,334	s
Tiempo de descanso	747,273	734,503	737,182	s
Tiempo total del ciclo	1103,441	2128,748	3336,515	s
Tiempo de trabajo del compresor	32,278	65,496	77,906	%
Tiempo de trabajo del compresor en 24 h	7,747	15,719	18,697	h

5.2 Selección del compresor.

Tabla 6. Selección del compresor (para una temperatura de condensación de 45 °)
C *

PARÁMETRO	S 1 (3171 RPM)	S 1 (2071 RPM)	S 2 (2071 RPM)
Temperatura evaporación(véase anexo i)	-26,47 °C	-28,96 °C	-28,96 °C
Btu/h compresor en la simulación	823	428	363
Compresor seleccionado	TECUMSEH TPJ1380MDS	EMBRACO EMU60CLP	EMBRACO EMI40CNC
Capacidad real compresor btu/h ()	834,5	441	369
COP	5,6	3,88	4,16

*véase anexo iii

En este numeral se realizó un análisis para fabricar un prototipo que cumpla los datos obtenidos en la simulación.

La selección del compresor se hizo para refrigerante R600a y los resultados se muestran en la tabla 6. Los datos de desempeño de los compresores seleccionados a las condiciones que se debe balancear el sistema se muestran en el Anexo III. Puede existir en el mercado diversos compresores que cumplan con la capacidad requerida a las condiciones dadas, pero para efectos de realizar un análisis rápido se revisaran solo los tres modelos presentados.

En el momento de fabricar el prototipo para validación, el sistema deberá estar balanceado a una capacidad real, la cual puede ser mayor que la obtenida con los cálculos de la simulación.

Para que el compresor cumpla con la capacidad se deberán realizar en el prototipo cambios importantes como en el caso del compresor TPJ1380MDS que para dar una capacidad real de 834,5 Btu/h se deberá balancear con una temperatura de condensación de aproximadamente 40°C como se muestra en la tabla 8 del Anexo III. Llevar el sistema a estos resultados implicaría un condensador muy eficiente y de gran tamaño si se tiene en cuenta que la temperatura ambiente de la prueba de consumo es de 32°C.

Tabla 7. Resultados de consumo.

COMBINACIÓN RPM GEOMETRÍA	S 1 (3171 RPM)	S 1 (2071 RPM)	S 2 (2071 RPM)
Consumo nevera kwh/24h	1,139	1,733	1,631
% reducción con respecto al consumo superior	34.3%	0%	5,9 %

Es de anotar que para el consumo en 24h, que se muestra en la tabla 7, solo se tiene en cuenta el compresor y no se tuvo en cuenta el consumo eléctrico del motoventilador, que si se tuvo en cuenta para las pérdidas y se tomó como 9 W. Diferenciar el consumo del motoventilador se vuelve importante si una de las simulaciones se realiza colocando ecuaciones de un motoventilador más eficiente que otro propuesto.

Como se observa en la tabla 7, al realizar cambios en la geometría y en las RPM del ventilador se pueden obtener mejoras de una geometría a otra hasta de un 34% en el consumo energético. Este dato es importante debido a que muestra que en el flujo de aire dado por el ventilador y/o por las mejoras en la geometría de los flujos de aire, existente un potencial significativo para la reducción del consumo energético.

Los resultados del aumento de la transferencia de calor con el aumento de la velocidad en el flujo de aire son visibles en los resultados de la simulación como se muestran en las siguientes figuras. Estas muestran como varia la disipación de calor al frente del paquete M en su plano por medio del cálculo del número de Eddy [20].

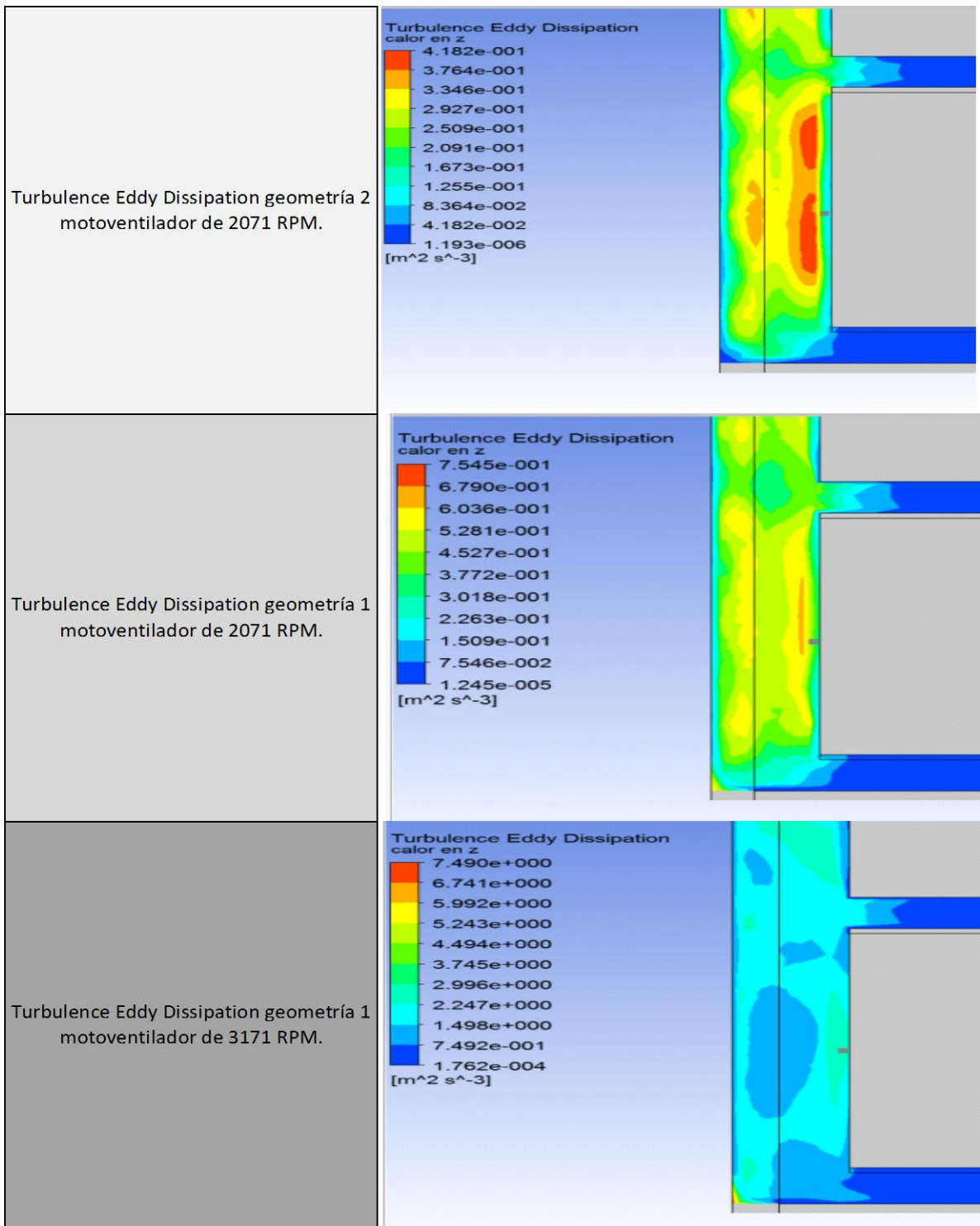


Figura 9 Turbulence Eddy Dissipation.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado una metodología con la cual se puede realizar una comparación de consumo energético, entre dos diseños de congelador de nevera sin escarcha funcionando a diferentes regímenes de caudal de aire en su interior.
- El flujo del aire al interior del refrigerador afecta directamente el funcionamiento del mismo, por lo tanto es de gran importancia realizar el diseño interno del refrigerador y de sus ductos teniendo en cuenta las distribuciones de aire y temperatura que se desea alcanzar para así producir equipos de alta eficiencia.
- Los resultados nos indican que para un diseño dado de nevera existe un flujo de aire aportado por un motoventilador que optimiza su funcionamiento y reduce el consumo energético. El punto óptimo de flujo para lograr el menor consumo es una combinación de caudal aportado por el ventilador y una caída de presión dada por los ductos de aire en la nevera.
- Comercialmente no es rentable que los ventiladores empleados en el evaporador de la nevera se especifiquen con un número exacto de RPM para que de un flujo determinado, esto lo podemos aproximar con el diseño en los ductos y salidas de aire para que tengan menos caídas de presión o con el diseño del aspa. De esta forma se puede alcanzar los resultados requeridos. Esta labor puede volverse dispendiosa si se hace con prototipos.
- En este trabajo se puede evidenciar que el uso de un software de simulación puede reducir la construcción de prototipos y reducir el número de pruebas.
- Si se revisa la ecuación de transferencia de calor para el congelador de la nevera $Q = Ux\Delta TxA$, manteniendo constante una misma área, se pueden tener aumentos por transferencia de calor si se incrementa el coeficiente global de transferencia de calor o el delta de temperatura. En los resultados obtenidos se evidencio aumentos en la transferencia por el aumento del coeficiente global, pero para las simulaciones realizadas los aumentos en el delta de temperatura no fueron de mucho aporte. Un trabajo posterior podría centrarse en determinar en qué punto o para que diseño se considera el delta de temperatura en vez de los aumentos de transferencia de calor vía velocidad del aire. Para concretar, una nevera tres estrellas debe tener una temperatura de evaporación inferior a una nevera dos estrellas, por lo tanto y considerando los resultados una nevera de tres estrellas deberá trabajar con un caudal de aire inferior.

BIBLIOGRAFÍA

[1] NTC5891: ARTEFACTOS DE REFRIGERACIÓN DOMÉSTICO. CARACTERÍSTICAS Y MÉTODOS DE ENSAYO.

[2] Prediction of the energy consumption of household refrigerators and freezers via steady-state simulation, Christian J.L. Hermes, Cláudio Melo, Fernando T. Knabben, Joaquim M. Gonçalves.

[3] "USO EFICIENTE Y AHORRO DE ENERGÍA". Memorias del curso de Gestión de la Energía. Facultad de ingeniería Universidad pontificia Bolivariana 2013.

[4] CONSULTORÍA PARA LA FORMULACIÓN ESTRATÉGICA DEL PLAN DE USO RACIONAL DE ENERGÍA Y DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA 2007 – 2025 CONTRATO 1517-33-2006 CONSORCIO BARILOCHE – BRP.

[5] DIRECTIVA 2010/30/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 Relativa a la indicación del consumo de energía y otros recursos por parte de los productos relacionados con la energía, mediante el etiquetado y una información normalizada.

[6] DIRECTIVA 2003/66/CE DE LA COMISIÓN de 3 de julio de 2003.

[7] Compresores EMBRACO VCC Tercera generación. Información disponible en la página
http://www.embraco.com/desktopmodules/catalogo/arquivos/04010_espanhol.pdf.

[8] Polyuretanos de última tecnología para aislamientos. Información disponible en la página
http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08a4/0901b803808a4b31.pdf?filepath=news/pdfs/noreg/162-02700.pdf&fromPage=GetDoc.

[9] Mapping the energy consumption of household refrigerators by varying the refrigerant charge and the expansion restriction, Joel Boeng, Cláudio Melo.

[10] http://www.nxtbook.com/nxtbooks/bnp/iam_2007/index.php?startid=159.

[11] Measurements of the air flow field in the freezer compartment of atop-mount no-frost refrigerator: the effect of temperature, V.T. Lacerda, C. Melo, J.R. Barbosa Jr, P.O.O. Duarte.

[12] A first-principles simulation model for the start-up and cycling transients of household refrigerators, Christian J.L. Hermes, Cláudio Melo.

[13] IEC 62.552:2007 - Household refrigerating appliances - Characteristics and test methods.

[14] NTC5020 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ARTEFACTOS REFRIGERADORES, REFRIGERADORES -CONGELADORES Y CONGELADORES PARA USO DOMÉSTICO

[15] NORMA COPANT 1707:2006 Eficiencia energética. Refrigeradores, congeladores y combinados de uso doméstico. Especificaciones y etiquetado.

[16] INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS Eficiencia energética – Aparatos de refrigeración eléctricos de uso doméstico – Especificaciones y etiquetado.

[17] Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2002, Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado.

[18] Notas de clase de la materia FLUIDOS COMPUTACIONALES, UPB 2013.

[19] Curso Fundamentos de refrigeración, Agosto 2009, EMBRACO-El POLO, Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC-Brasil.

[20] Ester S. Esteban, Ana M. Aramayo and Luis Cardón, "IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE TURBULENCIA TIPO LES (LARGE EDDY SIMULATION) A UNA CAVIDAD CALENTADA POR DEBAJO", "Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas Av Bolivia.

[21] On line: <http://www.embraco.com>

[22] On line: www.tecumseh.com

[23] NTC 4837/4838 Equipos de Refrigeración Comercial.


[24] Björk E., Setiawan T., S., Palm B., 2003, Air side heat transfer of a domestic refrigerator plate-type evaporator.

[25] Mitishita, Rodrigo; Barreira, Eduardo; Negrao, Cezar; and Hermes, Christian, "Simulation-Based Design and Optimization of Frost-Free Refrigerators: A Thermo-economic Approach" (2012). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1163. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1163>.

ANEXOS

Anexo I.Pull Down a 32°C

Tabla . Resultados de PULL DOWN a 32°C (Datos registrados en laboratorio de refrigeración de industrias Haceb).

		Tecnología & Desarrollo de Producto Reporte de pruebas de laboratorio					
MODELO: N 300L HACEB CONSECUTIVO: 0140		TIPO DE PRUEBA: PULL DOWN RESPONSABLE: AUXILIAR LABORATORIO				Humedad: 60% Temperatura: 32°C Fecha: 05/02/2014	
Clasificación climática: T		Clasificación energética: A					
Numero de estrellas: 2		Standard: Norma Interna de los proveedores de Compresores					
Compresor	Embraco EMU60CLP						
Condensador	Área 563,1 x 1120,8mm, Fabricado en tubo acero, 3/16"						
Capilar	Φ 0,028" x 2500 mm, Cobre						
Evaporador	Área 400x171,6x50,18 pasos tubería aluminio plano numero NS0062						
Refrigerante	ISOBUTANO R600a (gr):44						
Termostato	Robertshaw RAS 20205A (pos): (Damper):						
Moto ventilador	Sung Shin, WW, KELI MOTOR [TODOS LOS MOTOVENTILADORES FUNCIONAN CON ASPA VENTILANTE DE 120MM DE DIAMETRO]						
Resistencia de	Potencia 178W ± 2W						
		RPM MOTOVENTILADOR					
			3171	2950	2071	1558	
1	Entrada Evaporador	°C	-28,47	-29,47	-30,96	-33,64	
2	Salida Evaporador	°C	-26,61	-27,67	-28,82	-31,40	
3	Quick Chill	°C	-1,33	-1,11	-1,24	-0,96	
4	Conservador 1	°C	-9,27	-10,89	-3,20	0,23	
5	Conservador2	°C	-9,92	-3,57	-1,18	1,78	
6	Conservador 3	°C	-6,62	-4,26	-0,58	3,00	
7	Centro medio congelador	°C	-23,43	-25,14	-25,11	-26,92	
11	Descarga	°C	76,30	73,88	65,94	64,94	
12	Entrada Marco	°C	45,55	43,40	44,05	42,37	
13	Salida Marco	°C	65,91	63,67	60,55	59,15	
14	Entrada condensador	°C	45,77	44,52	42,87	41,78	
15	Condensador medio	°C	44,93	43,65	43,15	42,12	
16	Salida condensador	°C	42,65	42,16	42,34	41,56	
17	Succión	°C	29,05	27,40	24,19	27,06	
18	Carcasa compresor	°C	72,44	68,18	70,86	71,32	
	Presión Pico(Alta)	PSI	NA	NA	NA	NA	
	Presión de estabilización(0h)	PSI	NA	NA	NA	NA	
	Presión de baja(10h)	PSI	NA	NA	NA	NA	
	Presion Alta(10h)	PSI	NA	NA	NA	NA	
	Tiempo total de prueba	Horas	10,00	9,78	10	10	
	Voltaje	Voltio	115	115	115	115	
	Corriente	Amp.	1,44	1,44	1,21107765	1,18973265	

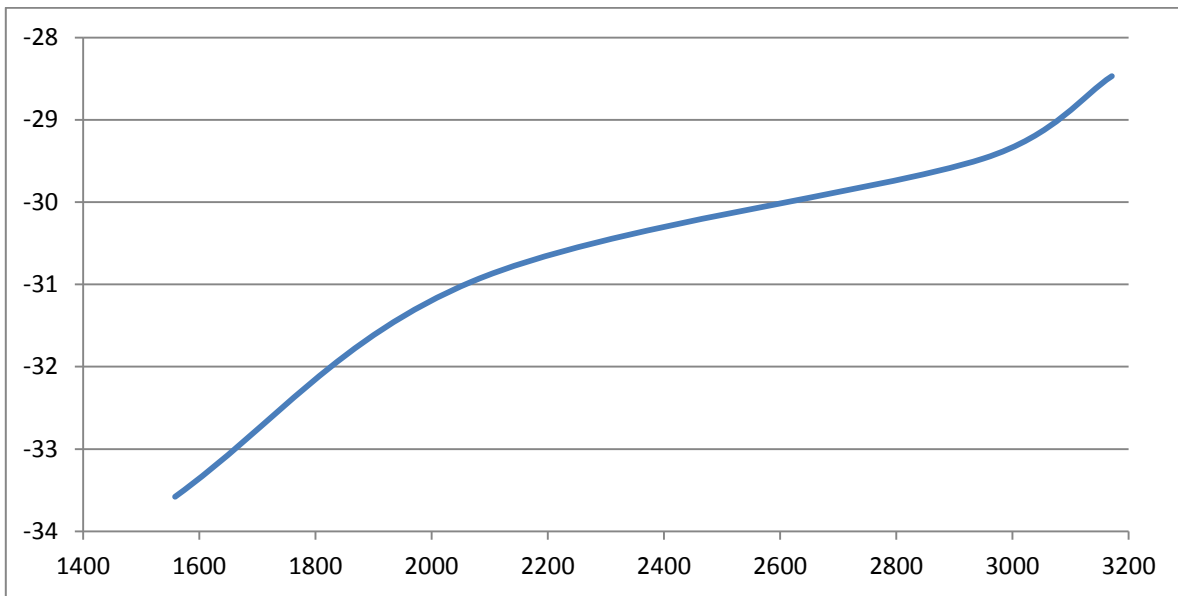


Figura 1 Temperatura de evaporación contra RPM Motoventilador. (Los datos de temperatura de evaporación sirven para determinar la potencia del compresor).

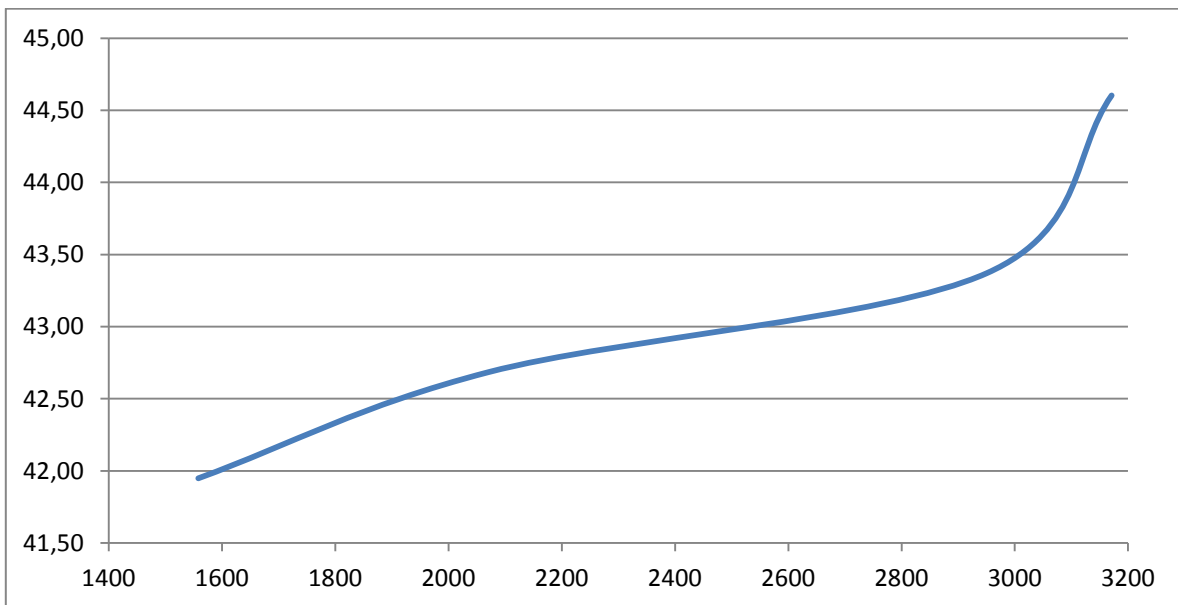


Figura 2. Temperatura de condensación contra RPM Motoventilador. (Los datos de temperatura de condensación sirven para determinar la potencia del compresor).

Anexo II. Curvas y Ecuaciones de Motoventilador

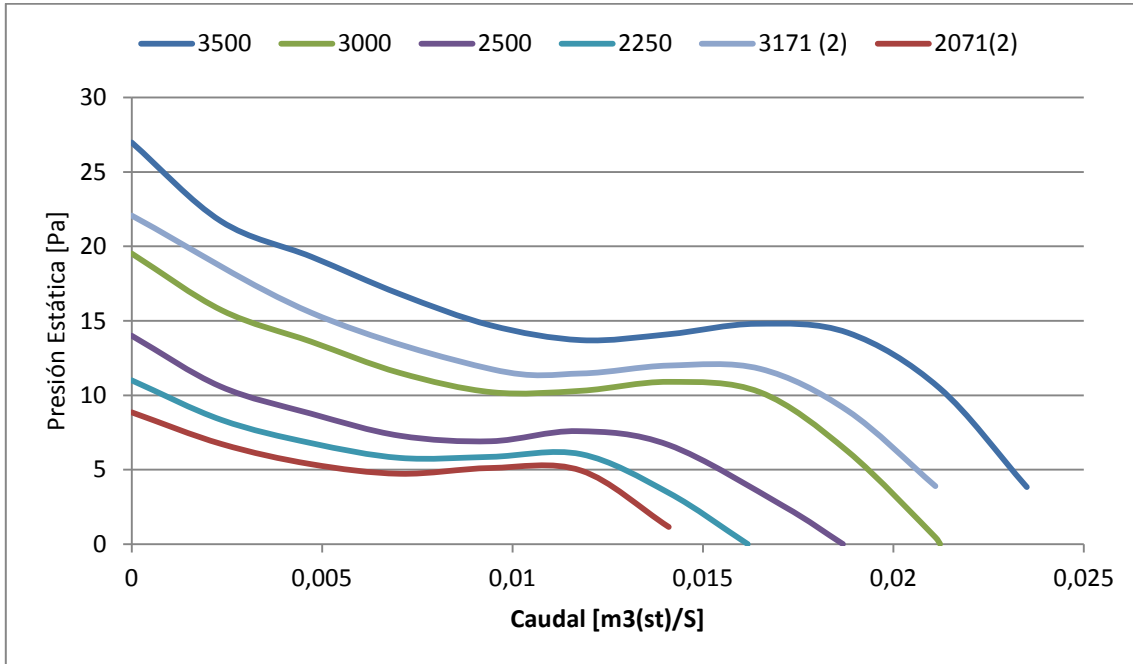


Figura 1. Caudal vs Presión estática para distintas RPM de motoventilador.

Tabla 1. Coeficientes del polinomio de las curvas de motoventilador [2].

COEFICIENTES	RPM VENTILADOR					
	3500	3171	3000	2500	2250	2071
X0	26,98	22,0713	19,52	13,992	11	8,852
X1	-3946,7	-2274,2	-3474,7	-2329,5	-1,56E+03	-1,49E+03
X2	1094000	370210	1,42E+06	614230	2,03E+05	4,52E+05
X3	-196530000	-53158000	-3,61E+08	-130630000	8,83E+06	-1,20E+08
X4	17914000000	2984000000	4,58E+10	14890000000	-1,10E+10	1,65E+10
X5	-8,10E+11	76534000000	-2,96E+12	-7,82E+11	1,86E+12	-9,98E+11
X6	1,71E+13	-1,18E+13	9,43E+13	1,49E+13	-1,23E+14	2,09E+13
X7	-1,30E+14	2,63E+14	-1,18E+15	0	2,81E+15	0

Tabla 2. Ecuaciones de motoventilador a las temperaturas de simulación.

COEFICIENTES	RPM VENTILADOR A UNA TEMPERATURA DADA			
	3171 RPM	-26,47°C	2071 RPM	-28,96°C
x0	22,0713		8,852	
x1	-2,54E+03		-1666	
x2	4,63E+05		5,66E+05	
x3	-7,44E+07		-1,68E+08	
x4	4,70E+09		2,59E+10	
x5	1,31E+11		-1,75E+12	
x6	-2,29E+13		4,10E+13	
x7	5,73E+14		0	

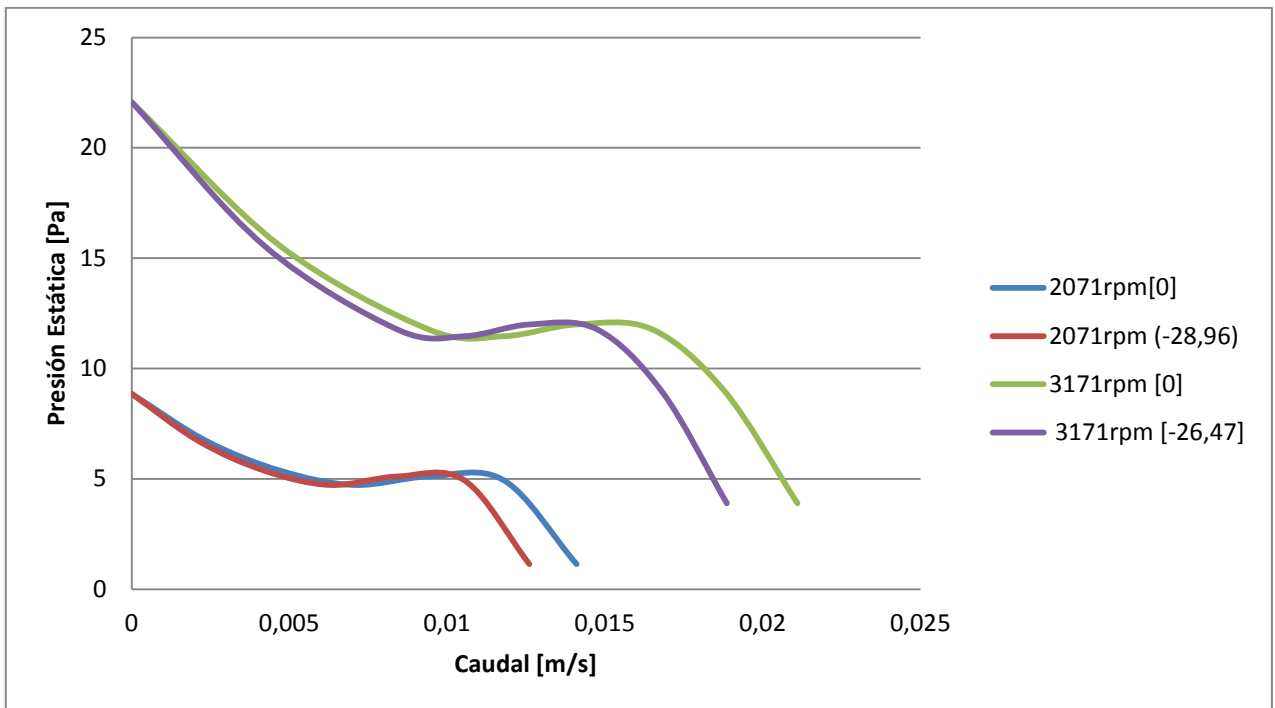


Figura 2. Curvas de motoventilador a temperatura estándares y corregidas a la temperatura de simulación.

Anexo III. Datos técnicos de compresores seleccionados

Datos

Performance

Dimensiones

Accesorios

Check Point - temperatura de condensación 54,4 °C

Temperatura de Evaporación	Capacidad de Refrigeración +/-5%			Consumo de Potencia +/-5%	Consumo de Corriente +/-5%	Eficiencia +/-7%		
	°C	(kcal/h)	(W)	(Btu/h)	(W)	(A)	(kcal/Wh)	(W/W)
-23,3	146	170	581	165	1,45	0,89	1,03	3,52

+ Tablas

+ Gráficos

- Calcular

temperatura de condensación (°C) ▼

Temperatura de Evaporación (°C) ▼

Temperatura de Evaporación	Capacidad de Refrigeración +/-5%			Consumo de Potencia +/-5%	Consumo de Corriente +/-5%	Flujo de Masa +/-5%	Eficiencia +/-7%		
	°C	(kcal/h)	(W)	(Btu/h)	(W)	(A)	(kg/h)	(kcal/Wh)	(W/W)
-30	111	129	441	116	1,31	1,38	0,96	1,12	3,81

Figura 1. Embraco EMU60CLP datos de capacidad y potencia [21].

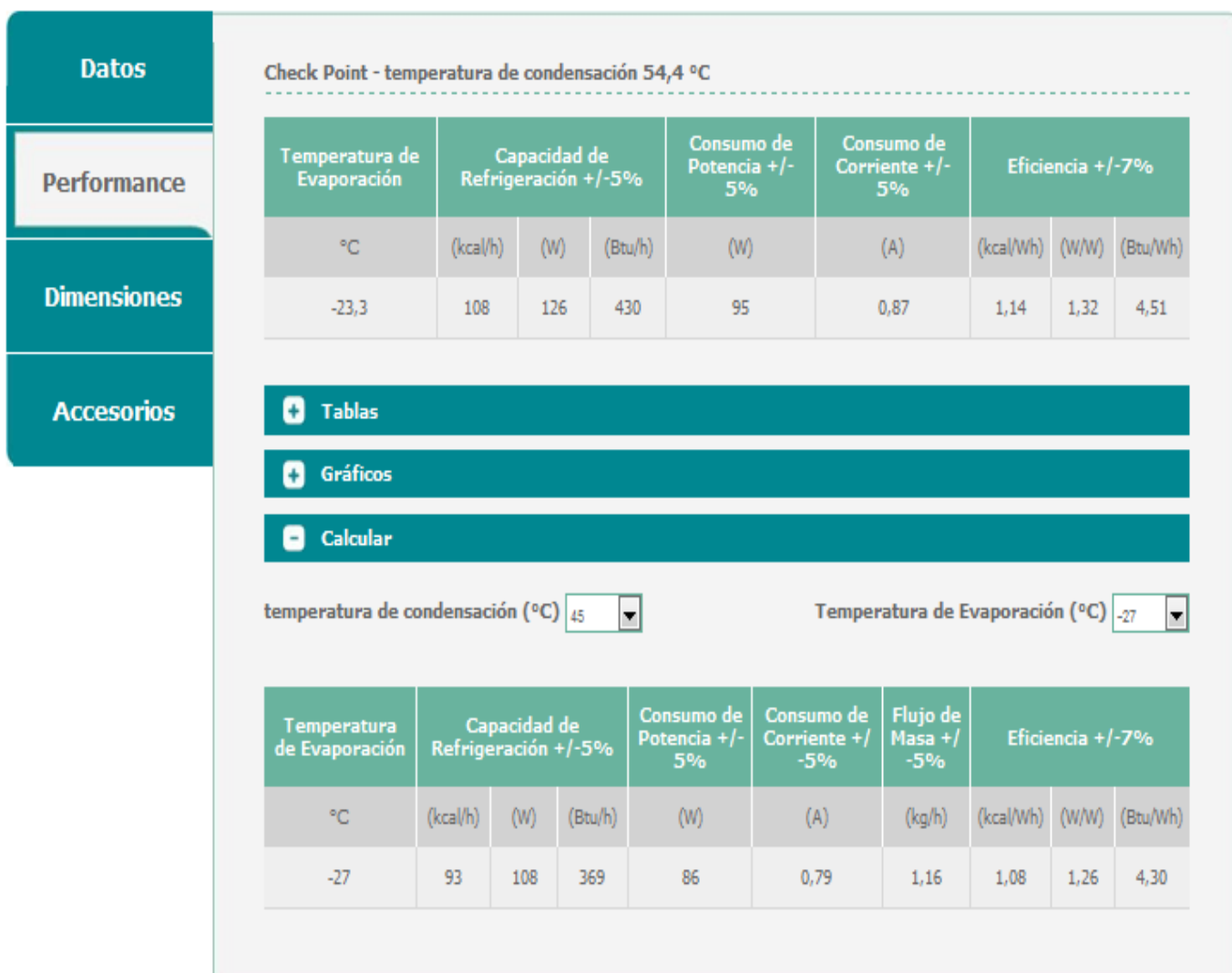


Figura 2. Embraco EMI40CNC datos de capacidad y potencia [21].

Tabla.Tecumseh TPJ1380MDS datos de capacidad y potencia [22].

Performance Information

Evap Temp (°C)	Condensing Temperature (°C)					
		30	40	50	60	70
-40	Btu/h	270	329	320	312	369
	Watts (Power)	82.2	90.4	91.9	93.1	100
	Amps	1.62	1.68	1.69	1.70	1.77
	Lb/h	1.63	2.13	2.05	2.07	2.86
-35	Btu/h	458	482	448	422	469
	Watts (Power)	105	113	115	116	125
	Amps	1.75	1.80	1.81	1.82	1.88
	Lb/h	2.95	3.21	2.94	2.83	3.53
-30	Btu/h	682	675	617	575	615
	Watts (Power)	125	133	135	138	148
	Amps	1.85	1.91	1.91	1.93	1.99
	Lb/h	4.46	4.49	4.05	3.82	4.46
-25	Btu/h	938	901	821	766	800
	Watts (Power)	143	151	154	159	171
	Amps	1.95	2.00	2.02	2.04	2.12
	Lb/h	6.16	5.97	5.37	5.04	5.63
-23.3	Btu/h	1030	984	898	838	871
	Watts (Power)	149	158	161	166	179
	Amps	1.98	2.04	2.06	2.09	2.16
	Lb/h	6.78	6.52	5.87	5.51	6.09
-20	Btu/h	1220	1150	1060	988	1020
	Watts (Power)	161	170	175	182	196
	Amps	2.04	2.11	2.15	2.18	2.27
	Lb/h	8.04	7.66	6.92	6.49	7.05

Anexo IV. Propiedades Térmicas Paquete de Ensayo

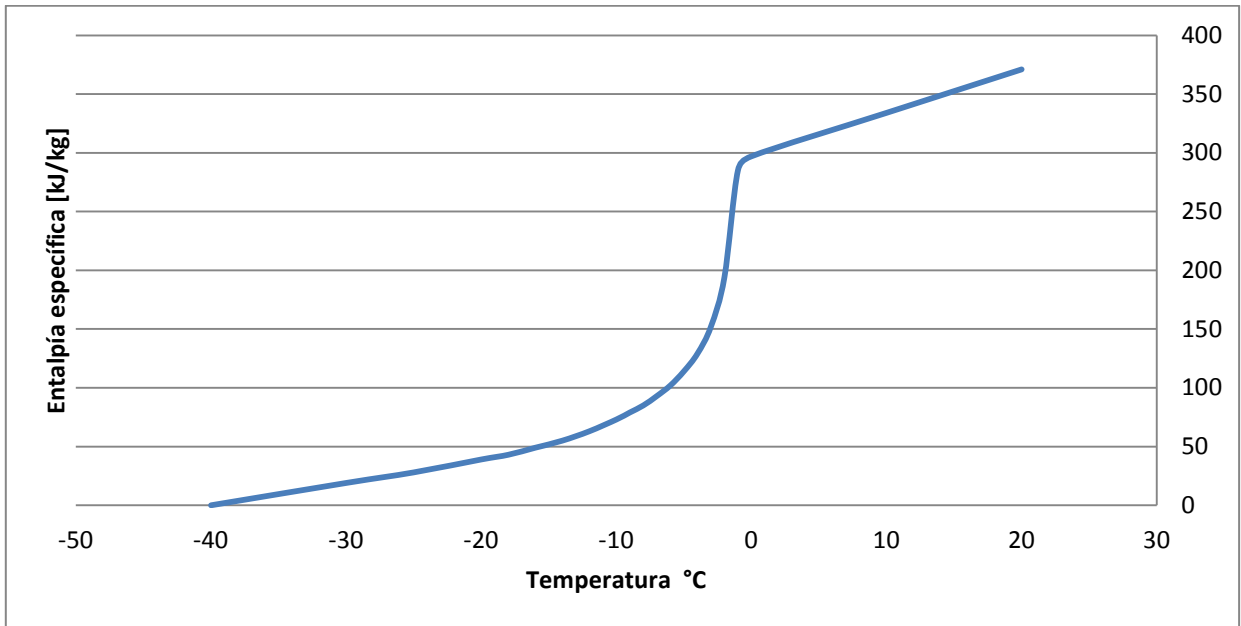


Figura. Paquete de Ensayo Entalpía Específica [kJ/kg] v.s La Temperatura [°C] [23].

Tabla. Calor Específico y Conductividad Térmica del Paquete de Ensayo [23].

Rango de temperatura [°C]	Incremento en la entalpía específica [kJ/kg]	Cp [kJ/kg.°C]	K* [W/m°C]
[-30] a [-20]	20 +/-2	2	1,57
10 a 20	37+/-4	3,7	
[-30] a 20	352+/-7		