



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESARROLLO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN DISPOSITIVO TERMOELÉCTRICO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA - DISEÑO MECÁNICO

P R E S E N T A

LIA GÓMEZ MENDIOLA

TUTOR:

DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

2010



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Marcelo López Parra

Secretario: Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich

Vocal: Dr. Vicente Borja Ramírez

1er. Suplente: Dr. Adrián Espinosa Bautista

2do. Suplente Dr. Álvaro Ayala Ruíz

Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS

Dr. Vicente Borja Ramírez

FIRMA

A mis padres

A mi hermana

A la memoria de mi tío

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis de maestría requirió de gran esfuerzo y dedicación y no hubiese sido posible su culminación sin la participación de todas y cada una de las personas que a continuación cito.

Quiero expresar especial gratitud a mi director de tesis, Dr. Vicente Borja Ramírez por su valiosa asesoría y confianza brindada durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Un agradecimiento especial a Ángel Luis Rodríguez Morales quien además de compartir sus conocimientos y ofrecer su ayuda desinteresada en la etapa de construcción e instrumentación, me brindó su apoyo y amistad.

Al equipo de asesores de la empresa colaboradora por sus críticas, sugerencias e información proporcionada para el desarrollo de este proyecto. En particular quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Victor Guerra Loeza por su invaluable colaboración y asesoramiento en la etapa de pruebas experimentales.

De igual manera agradezco a la empresa colaboradora, por el financiamiento otorgado para el desarrollo de la investigación aquí expuesta.

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México que me abrió las puertas para continuar desarrollándome profesionalmente.

Finalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la financiación para la realización de mis estudios de posgrado.

“Por mi raza hablará el espíritu”

TABLA DE CONTENIDO

	Página
TABLA DE CONTENIDO.....	v
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
3. OBJETIVOS Y ALCANCES.....	3
4. ANTECEDENTES	4
5. METODOLOGÍA.....	6
5.1 Etapa 1: Diseño conceptual.....	8
5.1.1 Búsqueda síntesis y análisis de información	8
5.1.2 Marcos comparativos.....	9
5.1.3 Establecimiento de requerimientos	9
5.1.4 Ficha general de descripción del producto	9
5.1.5 Alternativas de solución	10
5.1.6 Evaluación de los conceptos de solución	10
5.1.7 Conceptos seleccionados	11
5.1.8 Desarrollo de los conceptos seleccionados.....	11
5.2 Etapa 2: Diseño a nivel sistema.....	12
5.2.1 Establecimiento de especificaciones.....	12
5.2.2 Alternativas de configuración del sistema de refrigeración	12
5.2.2.1 Diagramas de componentes	13
5.2.3 Configuración final del sistema de refrigeración	14
5.2.3.1 Diagramas de componentes y funciones principales.....	14
5.2.3.2 Modelo de la configuración final del sistema en 3D.....	15

TABLA DE CONTENIDO

	Página
5.3 Etapa 3: Diseño de detalle.....	16
5.3.1 Dimensionamiento del sistema	17
5.3.1.1 Cálculo de la carga térmica.....	17
5.3.1.2 Cálculo del número de ensambles termoeléctricos.....	19
5.3.1.3 Cálculo de las dimensiones del contenedor de PCM.....	20
5.3.1.4 Cálculo del número de aletas del contenedor de PCM	21
5.3.1.5 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico.....	22
5.3.2 Selección de componentes principales	24
5.4 Etapa 4: Construcción del prototipo	25
5.4.1 Descripción	25
5.4.1.1 Aspectos generales.....	25
5.4.1.2 Consideraciones de diseño	26
5.4.2 Prototipo de prueba	27
5.4.2.1 Materiales y equipo	27
5.4.2.2 Construcción del prototipo.....	30
5.4.2.3 Instrumentación.....	35
5.4.2.4 Lugar de prueba.....	41
5.5 Etapa 5: Pruebas del prototipo	42
5.5.1 Descripción	42
5.5.1.1 Aspectos generales del diseño de experimentos.....	42
5.5.1.2 Aplicación del diseño de experimentos al caso de estudio	43
5.5.1.3 Consideraciones generales para la preparación de las pruebas	45
5.5.2 Parámetros evaluados	46
5.5.3 Características principales de las configuraciones del sistema de enfriamiento	47
5.5.3.1 Configuración 1	47
5.5.3.2 Configuración 2	48
5.5.3.3 Configuración 3	48
5.5.3.4 Configuración 4	48

TABLA DE CONTENIDO

	Página
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	49
6.1 Enfriamiento	49
6.1.1 Temperaturas mínimas	50
6.1.2 Superenfriamiento.....	52
6.1.3 Distribución de temperaturas	54
6.2 Calentamiento	55
6.2.1 Tiempo para llegar a la temperatura ambiente	55
6.3 Consumo de energía	57
6.4 Ciclos de funcionamiento.....	59
6.4.1 Tiempo de arranque.....	59
6.4.2 Tiempo de autonomía	61
6.4.3 Tiempo de funcionamiento	63
6.5 Sistema fotovoltaico seleccionado	68
7. CONCLUSIONES	69
8. TRABAJO FUTURO.....	72
9. REFERENCIAS	73
10. BIBLIOGRAFÍA	75

ANEXO 1. Fichas técnicas de dispositivos de enfriamiento comerciales.

ANEXO 2. Patentes.

ANEXO 3. Fichas técnicas de patentes.

ANEXO 4. Tablas descriptivas de componentes principales de dispositivos de enfriamiento comerciales.

ANEXO 5. Marcos comparativos.

ANEXO 6. Requerimientos de la empresa.

ANEXO 7. Ficha general de descripción del producto.

TABLA DE CONTENIDO

- ANEXO 8. Alternativas de conceptos de solución.
- ANEXO 9. Matriz de selección de conceptos.
- ANEXO 10. Conceptos seleccionados.
- ANEXO 11. Especificaciones del dispositivo de enfriamiento.
- ANEXO 12. Información proporcionada por la empresa
- ANEXO 13. Alternativas de configuración del sistema de refrigeración.
- ANEXO 14. Argumentos que justifican la selección de la configuración final del sistema.
- ANEXO 15. Diagramas de componentes y funciones principales del sistema de refrigeración seleccionado.
- ANEXO 16. Modelo tridimensional de la configuración final del sistema.
- ANEXO 17. Memoria de cálculo para la carga térmica.
- ANEXO 18. Hoja de cálculo para la carga térmica.
- ANEXO 19. Cálculo de la carga térmica con diferentes coeficientes de convección.
- ANEXO 20. Memoria de cálculo para los ensambles termoeléctricos.
- ANEXO 21. Hoja de cálculo para los ensambles termoeléctricos.
- ANEXO 22. Hoja de cálculo para las dimensiones del contenedor de PCM.
- ANEXO 23. Hoja de cálculo para el número de aletas del contenedor de PCM.
- ANEXO 24. Especificaciones de paneles fotovoltaicos comerciales.
- ANEXO 25. Hoja de cálculo para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.
- ANEXO 26. Fichas descriptivas de dispositivos comerciales para el sistema de refrigeración.
- ANEXO 27. Componentes comerciales seleccionados para la construcción del prototipo.
- ANEXO 28. Resultados de las pruebas experimentales 1, 2 y 3.
- ANEXO 29. Resultados de las pruebas experimentales 4, 5 y 6.
- ANEXO 30. Resultados de las pruebas experimentales 7, 8 y 9.
- ANEXO 31. Resultados de las pruebas experimentales 10 y 11.

Nota: Para acceder a la información contenida en los anexos, dirigirse con el autor del presente trabajo de investigación o con el tutor de tesis.

	Página
Tabla 1. Tarifa horaria industrial para servicio general en alta tensión.....	2
Tabla 2. Alternativas de configuraciones de sistemas de refrigeración.....	13
Tabla 3. Datos utilizados para el cálculo de la carga térmica.....	17
Tabla 4. Resultados de la carga térmica del dispositivo de enfriamiento	18
Tabla 5. Porcentaje de error de la carga térmica	18
Tabla 6. Ensamblajes termoeléctricos considerados para el sistema de refrigeración...	20
Tabla 7. Parámetros utilizados para el cálculo de la masa del PCM.....	21
Tabla 8. Parámetros utilizados para el cálculo del volumen del contenedor de PCM..	21
Tabla 9. Parámetros utilizados para el cálculo del número de aletas del contenedor de PCM	22
Tabla 10. Parámetros utilizados para el cálculo del número de baterías	22
Tabla 11. Parámetros utilizados para el cálculo del número de paneles fotovoltaicos	23
Tabla 12. Parámetros requeridos para la selección del controlador de carga	23
Tabla 13. Parámetros utilizados para el cálculo del calibre del cable de la instalación fotovoltaica.....	24
Tabla 14. Componentes seleccionados para el sistema de refrigeración.....	24
Tabla 15. Materiales utilizados para la construcción del prototipo	27
Tabla 16. Equipo de medición utilizado durante las pruebas del prototipo.....	28
Tabla 17. Parámetros evaluados durante el proceso de enfriamiento.....	46
Tabla 18. Parámetros evaluados durante el proceso de calentamiento	47
Tabla 19. Resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales del dispositivo durante el proceso de enfriamiento	50
Tabla 20. Ecuaciones que rigen el proceso de enfriamiento.....	52
Tabla 21. Tiempo para igualar la temperatura ambiente a partir de la temperatura mínima.....	56
Tabla 22. Ecuaciones que rigen el proceso de calentamiento	57
Tabla 23. Consumo energético del dispositivo de enfriamiento para las diferentes configuraciones	58
Tabla 24. Temperaturas mínimas de operación.....	60
Tabla 25. Tiempo de mantenimiento de la temperatura interior del dispositivo de enfriamiento	62
Tabla 26. Tiempo de funcionamiento del dispositivo de enfriamiento	63
Tabla 27. Ciclos de funcionamiento del dispositivo de enfriamiento	66

	Página
Figura 1. Proceso de desarrollo del producto	4
Figura 2. Esquema que muestra las tres áreas que se deben tomar en cuenta para el desarrollo de un producto sustentable.....	6
Figura 3. Etapas de desarrollo del proyecto	7
Figura 4. Diagrama de componentes del sistema de refrigeración-Alternativa 1	13
Figura 5. Diagrama de componentes del sistema de refrigeración seleccionado-Alternativa 6.....	15
Figura 6. Configuración final del sistema de refrigeración	16
Figura 7. Módulos de adquisición de datos para medición de señales de temperatura	28
Figura 8. Chasis para módulos de adquisición de datos.....	29
Figura 9. Módulo y tarjeta de adquisición de datos para medición de señales de voltaje	29
Figura 10. Watthorímetros utilizados durante las pruebas del prototipo	29
Figura 11. Termómetro infrarrojo y multímetro digital	30
Figura 12. Sensor de temperatura LM35 y termopar tipo T	30
Figura 13. Distribución de los sensores de temperatura en el interior de un dispositivo de enfriamiento convencional “solo”	36
Figura 14. Distribución de los termopares y sensores de temperatura en el interior del prototipo	37
Figura 15. Panel frontal que muestra numérica y gráficamente las temperaturas en el interior del dispositivo de enfriamiento.....	40
Figura 16. Factores y variables en el proceso de enfriamiento-Etapa 1	43
Figura 17. Método secuencial de pruebas para el prototipo	44
Figura 18. Curvas que describen el proceso de enfriamiento.....	50
Figura 19. Comportamiento del PCM durante el proceso de enfriamiento.....	53
Figura 20. Curvas de enfriamiento que representan las temperaturas en la sección superior, intermedia e inferior del dispositivo	54
Figura 21. Curvas que representan el proceso de calentamiento	55
Figura 22. Consumo de energía del dispositivo de prueba.....	58
Figura 23. Tiempo que presenta el mayor decremento de la temperatura interior del dispositivo durante el proceso de enfriamiento	59

	Página
Figura 24. Temperatura mínima en el interior del dispositivo después de 200 minutos de funcionamiento	61
Figura 25. Tiempos de mantenimiento de la temperatura interior del dispositivo de enfriamiento para las configuraciones 2, 3 y 4.....	62
Figura 26. Tiempos de funcionamiento del dispositivo de enfriamiento para las configuraciones 2, 3 y 4.....	64
Figura 27. Comparación entre tiempos de funcionamiento y autonomía del dispositivo de enfriamiento para las configuraciones 2, 3 y 4.	65
Figura 28. Ciclos de funcionamiento de la configuración 4.....	67
Figura 29. Consumo de energía del dispositivo de enfriamiento para diferentes rangos de variación de temperatura-Configuración 4	67

	Página
Foto 1. Etapas del proceso de corte en la pared trasera del dispositivo de enfriamiento para el montaje de los ensambles termoeléctricos	31
Foto 2. Ensamblados termoeléctricos montados en la pared trasera del dispositivo de enfriamiento.....	31
Foto 3. Placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos	32
Foto 4. Tapa y base del contenedor de PCM	33
Foto 5. Esquinas y uniones de la base y tapa selladas con poliuretano	33
Foto 6. Contenedor de PCM montado sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos	34
Foto 7. Ventiladores centrífugos colocados en la parte superior del interior del dispositivo de enfriamiento con la salida del flujo de aire direccionado hacia la sección inferior.....	35
Foto 8. Termopares embebidos en una masa de cobre y sensores de temperatura colocados en el interior del prototipo.....	37
Foto 9. Unidad de monitoreo de temperaturas	38
Foto 10. Unidad de monitoreo del consumo de energía del prototipo.....	39
Foto 11. Pantalla de monitoreo de la cámara de pruebas térmicas No. 20.....	41
Foto 12. Cámaras de pruebas térmicas de la empresa colaboradora en donde se llevaron a cabo las pruebas del prototipo.....	42

Este trabajo de tesis presenta el desarrollo, construcción y prueba de un dispositivo de enfriamiento de uso doméstico que utiliza tecnología termoeléctrica y un material de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) como parte de su sistema de refrigeración. La metodología que se siguió para la realización del presente trabajo de tesis consta de cinco etapas de desarrollo:

1. Diseño conceptual
2. Diseño a nivel sistema
3. Diseño de detalle
4. Construcción del prototipo
5. Pruebas del prototipo

La primera etapa incluye la identificación de los requerimientos de la empresa, mercado primario y secundario, así como la ficha general del producto, además se presentan los resultados de la búsqueda, análisis y síntesis de información comercial y patentes de productos análogos. Por último, se expone el proceso que se llevó a cabo para la generación, evaluación y selección de los conceptos de solución.

En la etapa 2 se establecen las especificaciones de diseño, se presentan diversas propuestas de posibles configuraciones del sistema de refrigeración, las propuestas incluyen diagramas generales de componentes y funciones principales. También se describe la configuración final del sistema de refrigeración a través de diagramas de funciones y componentes y un modelado en CAD.

En la etapa 3 se presentan los resultados de los cálculos referentes al dimensionamiento del sistema de refrigeración: carga térmica, contenedor de PCM y sistema fotovoltaico para el dispositivo de enfriamiento. Asimismo, se presenta la selección de los componentes que por funcionalidad, capacidad y precio se adaptaron a la configuración del sistema de enfriamiento del dispositivo.

En la etapa 4 se especifican los materiales y componentes que se utilizaron para la construcción del prototipo, así como el equipo de medición implementado para la instrumentación del dispositivo de enfriamiento. En la etapa 5 se describen los aspectos generales del diseño de experimentos utilizados, y los parámetros que se midieron durante las pruebas.

Los resultados incluyen las temperaturas mínimas promedio que se registraron en el interior del dispositivo de enfriamiento, el tiempo que se requirió para llegar a ellas, el tiempo de autonomía de la red eléctrica conseguido con el uso del PCM, el consumo de energía registrado durante las pruebas del prototipo y la determinación de los ciclos de funcionamiento del sistema. Además, se presentan los modelos matemáticos que describen el proceso de enfriamiento y calentamiento de cada configuración propuesta para el sistema de refrigeración del dispositivo.

This thesis presents the development, construction and testing of a cooling device for home use that employs thermoelectric technology and a phase change material (PCM) as part of its cooling system. The methodology followed for the completion of this study consists of five stages.

1. Conceptual design
2. System-level Design
3. Detail design
4. Prototype construction
5. Prototype testing

The first stage involves identifying company requirements, primary and secondary market definition and the general product description, also it is presented an analysis and synthesis of a research related to commercial information and patents of similar products. Finally, it is outlined the process carried out for the generation, evaluation and selection of solution concepts.

At the second stage, design specifications are set out and several proposals of possible configurations of the cooling system are presented. The proposals include general diagrams of components and functions. In addition, it is described the final configuration of the cooling system through diagrams of functions and components and a CAD model.

The third stage exposes the results of the calculations relating to the dimensioning of the cooling system: thermal load, PCM container and photovoltaic system as a part of the energy unit of the cooling device. Besides, it is presented the components that were selected on the basis of functionality, capacity and price to the cooling system configuration.

At the fourth stage, materials and components are specified for construction of the prototype as well as measuring equipment for the instrumentation of the cooling device. The final stage includes the general aspects of experimental design, and the parameters that were measured during the tests.

Results comprise average minimum temperatures inside the cooling device, the time required to reach them, the time of autonomy of the electrical power supply achieved with the use of PCM, power consumption measured during prototype testing and determination of operating cycles of the system. It is presented the mathematical models that describe the process of cooling and warming of each configuration for the cooling system as well.

1. INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XIX inició la conservación de alimentos a gran escala con el desarrollo de la refrigeración mecánica. Como consecuencia de la producción del frío artificial, se lograron mantener las propiedades y la calidad de los productos perecederos por un periodo de tiempo más prolongado. Se utilizaron diversos principios termodinámicos en las máquinas frigoríficas y numerosas sustancias refrigerantes (Torrella 1996).

Sin embargo, a partir del siglo XX, el ciclo de compresión de vapor se convirtió en el más extendido y aplicado tanto en el ámbito doméstico como industrial, ya que maneja un amplio margen de temperaturas y potencias frigoríficas. La eficiencia energética y su simple mantenimiento son algunas de las principales razones que justifican el amplio uso de este tipo de sistema refrigeración (Cengel y Boles 1996).

La aparición de los clorofluorocarbonos (CFC) tuvo sus inicios en los años treinta (Navarro et al 2003). Como consecuencia, la utilización de equipos de refrigeración en los hogares aumentó considerablemente, ya que estos fluidos refrigerantes cumplían todas las condiciones necesarias para un empleo seguro; es decir, estas sustancias no se consideraban tóxicas, inflamables ni perjudiciales para los materiales de construcción de los equipos frigoríficos. Además, con su uso se logró la estandarización de todos los equipos y componentes de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor.

Sin embargo, la preocupación por el agotamiento de la capa de ozono hizo que se estableciera el llamado Convenio de Viena¹, con el propósito de cooperar en actividades de investigación científica y observación sistemática de la capa de ozono, vigilar la producción de CFC, así como el intercambio de información y transferencia de tecnología.

De esta forma, en septiembre de 1987 surgió dentro del Convenio de Viena, el Protocolo de Montreal² del que México fue uno de los primeros signatarios. Este protocolo entró en vigor en 1989 y su propósito fue sentar las bases para la reducción paulatina de la utilización de CFC. Posteriormente, en junio de 1990 se hizo una revisión del protocolo en donde los países signatarios se obligaban a eliminar para el año 2000, la producción y consumo de las sustancias controladas: clorofluorocarbonos, bromofluorocarbonos, tetracloruro de carbono, y tricloroetano.

¹ En el Convenio de Viena no figura compromiso alguno en cuanto a la adopción de medidas para reducir la producción o el consumo de CFC. No obstante, el convenio fue un hito importante: las naciones acordaron en principio hacer frente a un problema ambiental mundial antes de que se sintieran sus efectos o se demostrara científicamente su existencia.

² El Protocolo de Montreal fue concebido para que se pudieran revisar los calendarios de eliminación de una serie de CFC (CFC 11, 12, 113, 114 y 115) y varios halones (1211, 1301, 2402) sobre la base de evaluaciones científicas y tecnológicas periódicas. Tras esas evaluaciones, el Protocolo se ajustó para acelerar los calendarios de eliminación. También se enmendó para introducir otros tipos de medidas de control y agregar nuevas sustancias controladas a la lista.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente existe la necesidad de generar conocimiento sobre sistemas de refrigeración pertenecientes a dispositivos de enfriamiento de uso doméstico que no utilicen refrigerantes basados en CFC, hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y freones causantes del deterioro de la capa de ozono. Es por ello que en el presente trabajo de investigación se propone diseñar, construir y realizar un estudio experimental de un sistema de refrigeración alterno al de compresión de vapor sobre consumo energético, capacidad de enfriamiento y rangos de temperaturas de operación.

Es de conocimiento general que el uso de energías renovables contribuye con la disminución del consumo energético de dispositivos alimentados a través de la red eléctrica convencional, sin embargo es necesario evaluar diversos escenarios que coadyuven con el ahorro de energía. Es por ello que se plantea, además del uso de la energía solar a través de paneles fotovoltaicos como fuente de alimentación del sistema de refrigeración, la conveniencia del uso de un material de cambio de fase (PCM, del inglés Phase Change Material) que funcione como almacenamiento térmico y forme parte del sistema de refrigeración propuesto.

Al igual que el uso de energías renovables, el empleo del PCM se hace con el propósito de otorgarle al dispositivo de enfriamiento un periodo de tiempo de autonomía de la red eléctrica convencional. Este periodo de tiempo corresponde con el horario que registra la tarifa con mayor costo del kilowatt perteneciente al sector industrial.

De esta forma se pretende reducir el costo de operación del dispositivo de enfriamiento doméstico durante su vida útil. Al mismo tiempo se beneficiaría de manera indirecta al sector industrial, ya que actualmente la tarifa horaria para servicio general en alta tensión¹ establecida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) indica que el costo del kilowatt es más del doble de las 19:00 a 22:00 horas, comparada con la tarifa aplicada en el resto de las horas del día. Lo anterior se debe a que la demanda de electricidad durante este periodo de tiempo se encuentra en su nivel máximo, ya que el sector residencial hace uso excesivo de electrodomésticos y televisores.

El costo del kilowatt establecido por la CFE para servicio general en alta tensión aplicado en las regiones central, noreste, noroeste, norte peninsular y sur de la república mexicana, se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tarifa horaria industrial para servicio general en alta tensión (CFE, 2010).

Día de la semana	Lunes a Viernes			
Horario (hrs)	0:00-6:00	6:00-19:00	19:00-22:00	22:00-24:00
Costo (\$)	0,8080	0,9504	2,0131	0,9504

¹ Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, Nivel subtransmisión (H-S), subtransmisión para larga utilización (H-SL), transmisión (H-T) y transmisión para larga utilización (H-TL).

3. OBJETIVOS Y ALCANCES

OBJETIVOS

Considerando la problemática presentada en el apartado anterior, se planteó un proyecto en el que participaron una empresa colaboradora y la UNAM, con los siguientes objetivos:

- Diseñar y construir un prototipo funcional de un dispositivo de enfriamiento que tenga un sistema alternativo al de compresión de vapor implementado en un gabinete de un refrigerador convencional utilizando tecnología disponible en el mercado.
- Realizar un estudio experimental del prototipo propuesto utilizando un material de cambio de fase como almacenamiento térmico. El estudio experimental consiste en la evaluación del consumo energético del sistema de refrigeración, así como las temperaturas mínimas alcanzadas en el enfriador, el tiempo aproximado para lograr las temperaturas mínimas y el tiempo que registra el mayor decremento de la temperatura interior del dispositivo de enfriamiento.
- Determinar el periodo de autonomía de la red eléctrica convencional que el PCM le puede proporcionar al sistema de refrigeración.
- Generar conocimiento que permita el desarrollo de un nuevo concepto que tenga aplicación en un sistema de refrigeración doméstico.

ALCANCES

Los alcances del proyecto fueron:

- Proponer una configuración que permita un buen desempeño del sistema de refrigeración:
¹ Consumo de energía: $E_{MAX} \leq 248.4$ kWh/año
Temperatura interior: $T = 4 \pm 3^{\circ}C$
- Establecer los parámetros requeridos para la construcción o selección del control de temperatura y para la selección del sistema fotovoltaico perteneciente a la unidad de energía del sistema de refrigeración.
- Entregar un reporte parcial de cada etapa del proyecto que contenga la metodología seguida y los resultados obtenidos durante su desarrollo.

¹ Valores establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2002 para refrigeradores clasificados como "solos", los cuales contienen únicamente un compartimento de enfriamiento sin congelador.

4. ANTECEDENTES

Con base en un curso realizado en el 2007 (Agogino et al 2008a y Borja et al 2008), en agosto del 2008 se llevó a cabo el curso binacional *New Product Development* (NPD), el cual abordó métodos y técnicas de diseño mediante su aplicación en un proyecto de innovación de productos orientados al usuario.

El curso siguió la metodología propuesta por Ulrich y Eppinger (2008), (Figura 1), complementada con la visión y experiencia de los profesores participantes (Agogino et al 2008b).



Figura 1. Proceso de desarrollo del producto, Ulrich y Eppinger (2008).

El objetivo del proyecto fue proponer conceptos para el área de refrigeradores domésticos que optimizaran los ciclos de vida de alimentos. El proyecto se diferenció de otros por la aplicación de técnicas de diseño centradas en el usuario y los resultados obtenidos a partir de ellas. Los conceptos propuestos incluyeron la voz del usuario en cada etapa de su desarrollo. Los factores cualitativos evaluados giraron alrededor de la originalidad, la facilidad de uso, la complejidad, comunicación, y ventajas evidentes de los conceptos propuestos. El proyecto fue desarrollado en colaboración con una empresa mexicana dedicada al diseño, fabricación, distribución y venta de aparatos electrodomésticos.

El proyecto fue realizado por un equipo multidisciplinario, integrado por estudiantes de maestría y licenciatura de ingeniería mecánica y mecatrónica, así como de diseño industrial. Durante su desarrollo, se contó con la asesoría de profesores de la UNAM, de la Universidad de California, Berkeley, y de una empresa colaboradora.

Como resultado de este proyecto se publicó un artículo en el XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM¹ titulado “Diseño de nuevos productos con un enfoque orientado al usuario” (Gómez et al 2009), el cual describe la metodología de diseño centrado en el usuario utilizada durante el desarrollo del concepto de un producto.

¹ Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica.

4. ANTECEDENTES

Con base en lo anterior y continuando con la línea de investigación sobre innovación de productos sustentables en el área de refrigeración doméstica, se llevó a cabo el proyecto que se reporta en esta tesis, “Desarrollo, construcción y prueba de un dispositivo termoeléctrico”, el cual propone el uso de sistemas de refrigeración alternos al de compresión de vapor e incluye aspectos de diseño sustentable durante su desarrollo.

En particular, la investigación se enfocó en la aplicación de la termoelectricidad en refrigeradores domésticos junto con el uso de un material de cambio de fase como almacenamiento térmico, el cual elimina el uso de sustancias tóxicas para el medio ambiente como lo son los refrigerantes basados en freones, CFC y HCFC utilizados actualmente.

Conjuntamente, se propuso el uso de paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica como parte de la unidad de energía del sistema de refrigeración, por lo que a partir de las pruebas experimentales y resultados logrados en el presente trabajo de investigación, se especificaron los parámetros necesarios para la selección del sistema fotovoltaico y se estableció el rango de operación de la unidad de control de temperatura del dispositivo.

De igual forma el proyecto se desarrolló en colaboración con la empresa mencionada con anterioridad, con el propósito de contribuir con la innovación y desarrollo tecnológico en el ámbito de la refrigeración doméstica.

La metodología utilizada para el desarrollo de la primera etapa del proyecto incorporó un enfoque de sustentabilidad planteado por los profesores del curso “Diseño Sustentable” de la Universidad Nacional Autónoma de México. Este enfoque consistió en desarrollar productos y servicios innovadores que satisficieran las necesidades del usuario e integraran aspectos sociales, económicos y ambientales durante su ciclo de vida.

El curso se llevó a cabo de febrero a junio de 2009 y cubrió procesos, métodos y técnicas para evaluar diversos aspectos de la sustentabilidad del producto y servicio a lo largo de su ciclo de vida.

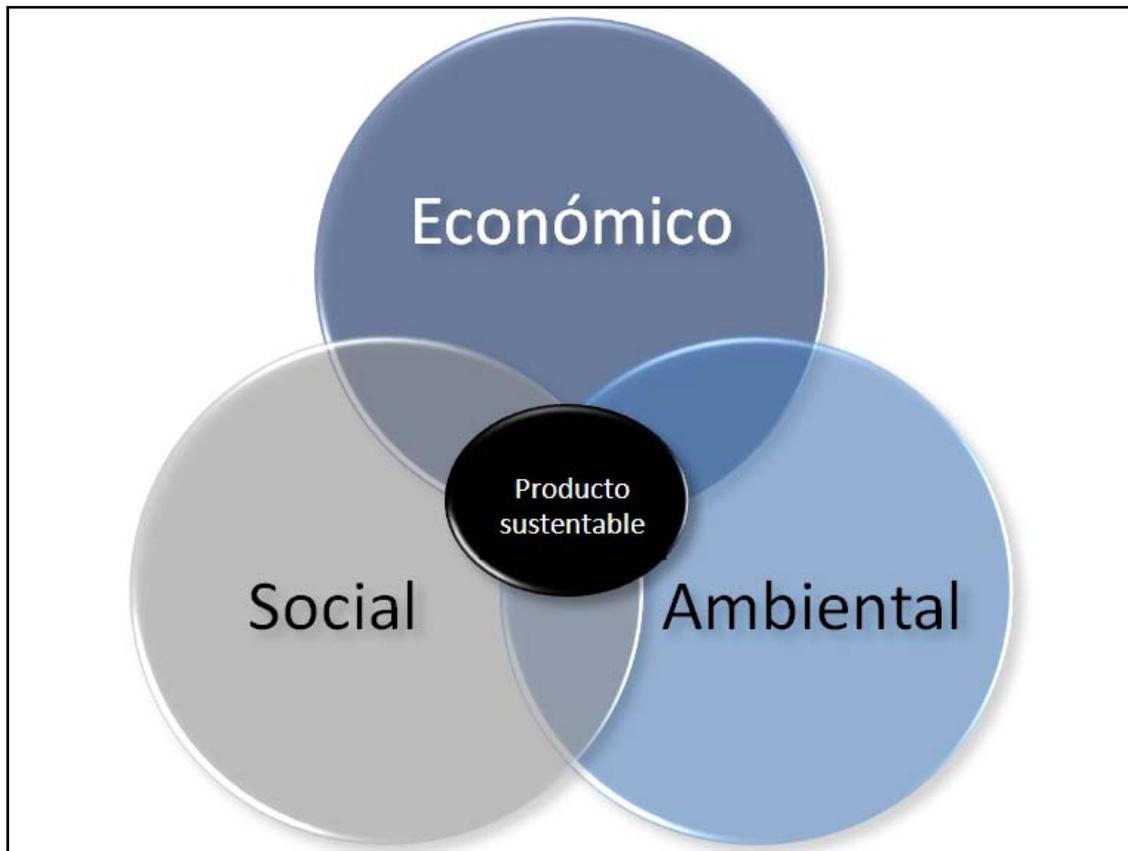


Figura 2. Esquema que muestra las tres áreas que se deben tomar en cuenta para el desarrollo de un producto sustentable.

El proyecto reportado en esta tesis, se integró por las siguientes etapas (Figura 3):

1. Diseño conceptual.
2. Diseño a nivel sistema.
3. Diseño de detalle.
4. Construcción del prototipo.
5. Pruebas del prototipo.

5. METODOLOGÍA

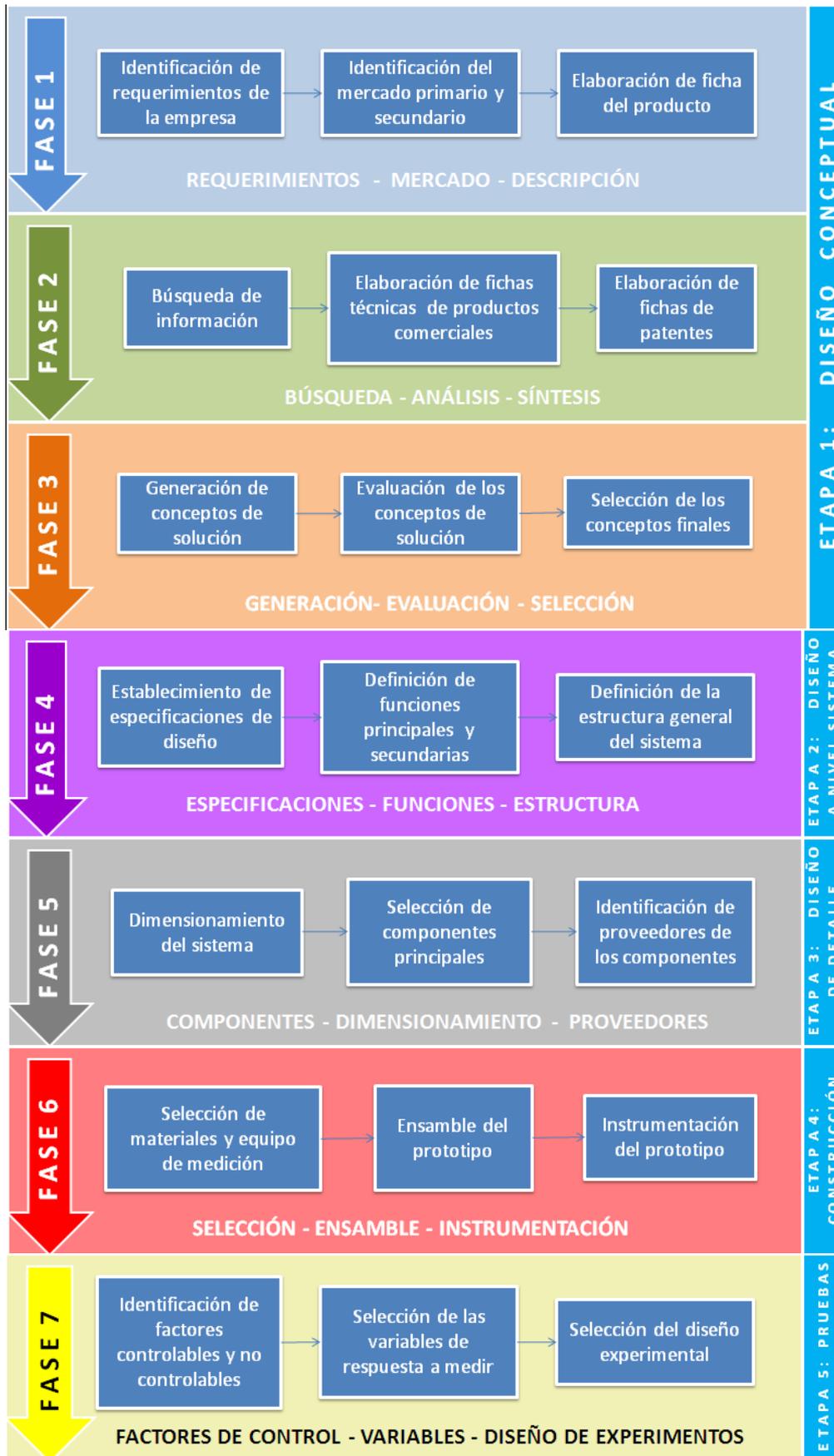


Figura 3. Etapas de desarrollo del proyecto.

5.1 ETAPA 1: DISEÑO CONCEPTUAL

Esta etapa está constituida principalmente por la búsqueda, síntesis y análisis de información de patentes y productos similares existentes en el mercado, establecimiento de requerimientos objetivo, identificación de componentes principales y propuestas de conceptos de solución.

Los conceptos de solución seleccionados se caracterizaron por el uso de la energía solar a través de paneles fotovoltaicos, como una fuente de suministro de energía complementaria con la energía proporcionada por la red eléctrica convencional. Adicionalmente, en uno de los conceptos se propuso la eliminación del uso de gases refrigerantes como los CFC, HCFC y freones que son responsables de la destrucción de la capa de ozono. También se propuso la reducción del número de componentes del sistema de refrigeración a través del uso de celdas termoeléctricas, las cuales sustituyen el tradicional sistema de refrigeración por compresión de vapor.

5.1.1 BÚSQUEDA, SÍNTESIS Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se realizó un estudio comparativo de once marcas de refrigeradores existentes en el mercado. Fueron analizados treinta y cuatro dispositivos entre los cuales se encuentran refrigeradores termoeléctricos, híbridos (energía solar y eléctrica), de absorción y de compresión de vapor. Para su análisis se elaboraron dieciocho fichas técnicas, las cuales contienen la siguiente información: marca, modelos, dimensiones, sistema de refrigeración, tipo de aislante, consumo de energía eléctrica, valores de voltaje, precio, entre otras (Anexo 1).

Así mismo, se hizo una búsqueda de patentes a través del buscador en línea *Free Patents Online*⁶ y en la base de datos *World Intellectual Property Organization*⁷ (WIPO). Se localizaron treinta y cinco patentes sobre el tema (Anexo 2), de las cuales fueron analizadas un total de veinte. Las patentes incluyen refrigeradores termoeléctricos, híbridos (energía solar y eléctrica convencional), de absorción, adsorción y de compresión de vapor. Su análisis consistió en la elaboración de fichas técnicas que sintetizan su principio de funcionamiento y sus componentes principales, además se incluyen figuras y esquemas representativos de los sistemas de refrigeración (Anexo 3). Con base en estas fichas se realizó un análisis y una identificación de los componentes principales de refrigeradores comerciales, los cuales fueron sintetizados en tablas descriptivas (Anexo 4).

⁶ Free Patents Online. *Search Patents*. [Online]. Disponible en: <http://www.freepatentsonline.com/search.html> [Fecha de acceso: mayo de 2009].

⁷ World Intellectual Property Organization. *Search International Patent Applications*. [Online]. Disponible en: <http://www.wipo.int/pctdb/en/> [Fecha de acceso: mayo de 2009].

5.1.2 MARCOS COMPARATIVOS

Con base en las tablas comparativas generadas, se elaboraron marcos comparativos para identificar nichos de mercado y detectar oportunidades para la innovación. Los marcos comparativos representaron gráficamente la información recopilada en el benchmarking y en la búsqueda de patentes.

Para la elaboración de estas representaciones se involucraron aspectos como el costo, el uso de energías renovables y tecnologías de refrigeración existentes en el mercado (Anexo 5).

5.1.3 ESTABLECIMIENTO DE REQUERIMIENTOS

A partir de la información obtenida de la empresa y de acuerdo con los criterios de diseño sustentable, se definieron los requerimientos del producto, los cuales se expresaron con base en los siguientes lineamientos:

- a) En términos de lo que el producto tiene que hacer y no cómo podría hacerlo.
- b) Utilizando fraseo positivo y no negativo.
- c) Expresando la necesidad como un atributo del producto.

Los requerimientos de la empresa participante fueron revisados, complementados y aprobados por el equipo de asesores de la empresa y se clasificaron por orden de prioridad, siendo el valor 1 equivalente al requerimiento con mayor importancia y el valor 2 al de menor importancia.

Los requerimientos que debe satisfacer el dispositivo de enfriamiento propuesto se relacionan principalmente con el uso de energías renovables como fuente de suministro de energía, lograr un periodo de tiempo de autonomía de la red eléctrica convencional, que sea de uso doméstico y finalmente que el sistema de refrigeración propuesto utilice tecnologías existentes en el mercado (Anexo 6).

5.1.4 FICHA GENERAL DE DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Con base en los requerimientos establecidos, se elaboró una ficha general de descripción del producto (Borja y Ramírez 2006). La ficha contiene una breve descripción del producto y especifica su objetivo de manera general sin mencionar qué tipo de tecnología se pretendía utilizar. Además, se define el mercado primario y secundario al cual va dirigido el producto. La ficha también incluye las características básicas del sistema, los principales competidores, así como los riesgos y alcances del proyecto (Anexo 7).

5.1.5 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Con base en la información obtenida a partir de patentes y del estudio comparativo, se generaron once conceptos de solución. Estos conceptos consisten en diversas configuraciones de sistemas de refrigeración y fueron sintetizadas en tablas (Anexo 8), las cuales contienen la siguiente información:

- a) Componentes básicos del sistema de refrigeración.
- b) Descripción del arreglo de interconexión de los componentes.
- c) Principio de funcionamiento.
- d) Ventajas y desventajas de las configuraciones propuestas.
- e) Bocetos de cada componente.
- f) Esquema general del sistema de refrigeración.

5.1.6 EVALUACIÓN DE LOS CONCEPTOS DE SOLUCIÓN

El método empleado para evaluar y seleccionar los conceptos finales consistió en la elaboración de una matriz de selección propuesta por Ulrich y Eppinger (2008) (Anexo 9). Cada concepto fue evaluado usando criterios de sustentabilidad entre otros. El procedimiento de selección consistió en asignar puntos a cada concepto. De esta forma, se seleccionaron dos conceptos finales (Anexo 10).

Los criterios de evaluación y selección se relacionaron principalmente con aspectos ambientales, de los cuales destacan la reducción de consumo de energía eléctrica durante la vida útil del producto y el uso de energías renovables.

Los aspectos económicos y sociales se relacionan de manera indirecta con los criterios de selección del producto. En el ámbito económico, el uso de tecnologías limpias impulsa la transición de una economía basada en combustibles fósiles cada vez más caros a otra basada en energía renovable, la cual no tiene costo.

En cuanto al aspecto social, la inversión en fuentes de energía renovable o de baja emisión de CO₂ contribuye con la generación de millones de empleos. Según un informe del Consejo Climático de Copenhagen, se crearán aproximadamente tres millones de empleos en EE.UU. para el año 2025 con el desarrollo de tecnologías limpias⁸.

⁸ Diputación de Barcelona, 2009. Invertir en fuentes de energía renovable permitiría crear millones de empleos. [Online]. Disponible en: <http://www.suelosolar.es/newsolares/comentar.asp?id=743> [Fecha de acceso: 5 de junio de 2009].

Los criterios de carácter sustentable fueron establecidos por el equipo de diseño. Estos criterios se seleccionaron tomando como referencia la guía titulada “*The designer’s field guide for sustainability: an overview of sustainable product development and the product life cycle*”⁹ y los sugeridos en el manual titulado “*Design for Sustainability: A practical approach for developing economies*”¹⁰. Este manual es una publicación dirigida a pequeñas y medianas empresas (PYMES) interesadas en la innovación de productos sustentables y pertenecientes a economías en vías de desarrollo. El documento fue publicado por la UNEP¹¹ en conjunto con la Universidad Tecnológica de Delft y expertos en eco-diseño.

5.1.7 CONCEPTOS SELECCIONADOS

Los dos conceptos seleccionados (8 y 10) son configuraciones de sistemas de refrigeración que contribuyen con la reducción del consumo de energía eléctrica mediante el uso de la energía solar. El primer concepto seleccionado (No.8) está constituido por paneles fotovoltaicos, uso de la red eléctrica convencional, celdas termoeléctricas y contenedores de almacenamiento térmico.

El segundo (No.10) combina el sistema de refrigeración por compresión de vapor con el uso de paneles fotovoltaicos, contenedores de almacenamiento térmico y un compresor de corriente directa DC. La descripción de cada concepto se puede ver con más detalle en el Anexo 10.

Estos conceptos de solución se consideran alternativas sustentables, ya que contribuyen con la disminución de residuos sólidos y emisiones de bióxido de carbono (CO₂) a través del uso de energías alternas como la solar, para suministrar de energía eléctrica al dispositivo de enfriamiento. Por otro lado se reduce el número de componentes del sistema de refrigeración y se elimina el uso de sustancias tóxicas como el refrigerante 134a.

5.1.8 DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS SELECCIONADOS

El desarrollo del concepto No. 8 (Anexo 10) es el que se expone en la presente tesis hasta la etapa de pruebas de prototipo. Por otra parte, el desarrollo del concepto No. 10 (Anexo 10) se presenta en la tesis titulada “Diseño y construcción de enser híbrido de aplicación residencial” (Pérez, 2010).

⁹ LUNAR DESIGN, INC., 2006. *The designer’s field guide for sustainability: An overview of sustainable product development and the product life cycle*. [Online]. Disponible en: http://www.lunar.com/docs/the_designers_field_guide_to_sustainability_v1.pdf [Fecha de acceso: mayo de 2009].

¹⁰ Crul, M., R., M. y Diehl, J., C. 2007. *Design for Sustainability: A practical approach for developing economies*. [e-book]. The Neatherlands: Delft University of Technology, Faculty of Industrial Design Engineering, p.65. Disponible en: <http://www.d4s-de.org/> [Fecha de acceso: abril de 2009].

¹¹ UNEP: United Nations Environment Programme.

Ambos trabajos de investigación presentan una metodología de trabajo similar con un objetivo en común, emplear una unidad de energía híbrida que utilice energía eléctrica convencional y una fuente de energía renovable para el funcionamiento del dispositivo de enfriamiento.

Por otro lado, la principal diferencia entre los dos trabajos de investigación consistió en los componentes que integran al sistema de refrigeración, ya que en el concepto No.10 se conservó el sistema tradicional por compresión de vapor y para el concepto No.8 se propuso uno alternativo a éste y se incluyó el uso de un material de cambio de fase que sirvió como almacenamiento térmico.

A continuación se presenta el desarrollo del concepto No.8 y los resultados que se obtuvieron una vez que se realizaron las pruebas de prototipo.

5.2 ETAPA 2: DISEÑO A NIVEL SISTEMA

La etapa 2 muestra las especificaciones del sistema de refrigeración definidos a partir de los requerimientos y datos proporcionados por la empresa colaboradora, elaborados en la primera etapa del proyecto.

En seguida se presentan diversas propuestas de posibles configuraciones del sistema de refrigeración, las propuestas incluyen diagramas generales de componentes y funciones principales. Posteriormente se describe la configuración final del sistema de refrigeración a través de diagramas de funciones y componentes y un modelado en CAD.

5.2.1 ESTABLECIMIENTO DE ESPECIFICACIONES

Las especificaciones (Anexo 11) se definieron con base en los requerimientos mencionados anteriormente (Anexo 6) e información proporcionada por el equipo de asesores de la empresa colaboradora (Anexo 12).

5.2.2 ALTERNATIVAS DE CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Se elaboraron seis alternativas de configuración para el sistema de refrigeración del dispositivo de enfriamiento (Anexo 13), las configuraciones están constituidas por tres unidades principales: unidad de energía, unidad de control y la unidad termoeléctrica. En la unidad termoeléctrica se encuentra la unidad de refrigeración.

5.2.2.1 Diagramas de componentes

Las alternativas se representaron por medio de diagramas de bloques de componentes (Figura 4) y para cada una de ellas se especificaron sus ventajas y desventajas (Anexo 13).

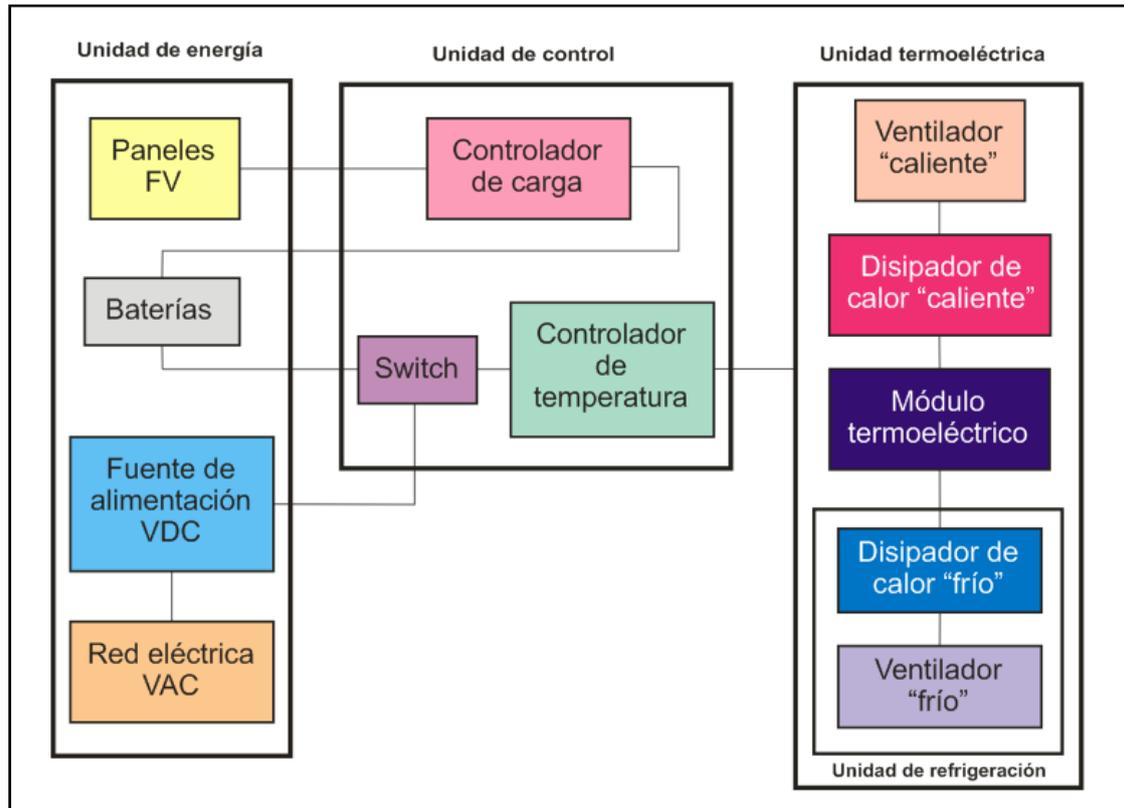


Figura 4. Diagrama de componentes del sistema de refrigeración - Alternativa 1.

En la Tabla 2 se muestran cada una de las alternativas de las configuraciones propuestas con los componentes que las integran.

Tabla 2. Alternativas de configuraciones de sistemas de refrigeración.

Alternativa	Componentes
1	Paneles fotovoltaicos, baterías, fuente de alimentación VDC, controlador de carga, switch, controlador de temperatura y ensambles termoelectricos tipo aire-aire.
2	Paneles fotovoltaicos, baterías, fuente de alimentación VDC, controlador de carga, switch, controlador de temperatura, ensambles termoelectricos tipo aire-aire, contenedor de PCM y PCM.
3	Fuente de alimentación VDC, controlador de temperatura, ensambles termoelectricos de contacto directo, PCM y contenedor de PCM.
4	Paneles fotovoltaicos, baterías, controlador de carga, controlador de temperatura, ensambles termoelectricos de contacto directo, PCM y contenedor de PCM.

Tabla 2. Alternativas de configuraciones de sistemas de refrigeración.

Alternativa	Componentes
5	Paneles fotovoltaicos, fuente de alimentación VDC, controlador de temperatura, switch, ensambles termoeléctricos de contacto directo, disipadores de calor, PCM y contenedor de PCM.
6	Paneles fotovoltaicos, fuente de alimentación VDC, baterías, controlador de carga, switch, controlador de temperatura, ensambles termoeléctricos de contacto directo, contenedor de PCM, PCM y ventiladores.

5.2.3 CONFIGURACIÓN FINAL DEL SISTEMA

La configuración del sistema de refrigeración seleccionada hace referencia a la alternativa 6 indicada en la sección 5.2.2.1, Tabla 2, la cual se compone por los siguientes elementos: paneles fotovoltaicos, fuente de alimentación VDC, switch, controlador de temperatura, ensambles termoeléctricos de contacto directo, disipadores de calor, PCM, contenedor de PCM, y ventiladores. Los argumentos que justifican la selección de dicha configuración se pueden consultar en el Anexo 14.

5.2.3.1 Diagramas de componentes y funciones principales

La configuración del sistema de refrigeración seleccionada está constituida por tres unidades principales: unidad de energía, unidad de control y la unidad termoeléctrica. En la unidad termoeléctrica se encuentra la unidad de refrigeración (Figura 5). La descripción detallada de la configuración general del sistema de refrigeración y la función que cada componente desempeña dentro de él, se puede consultar en el Anexo 15.

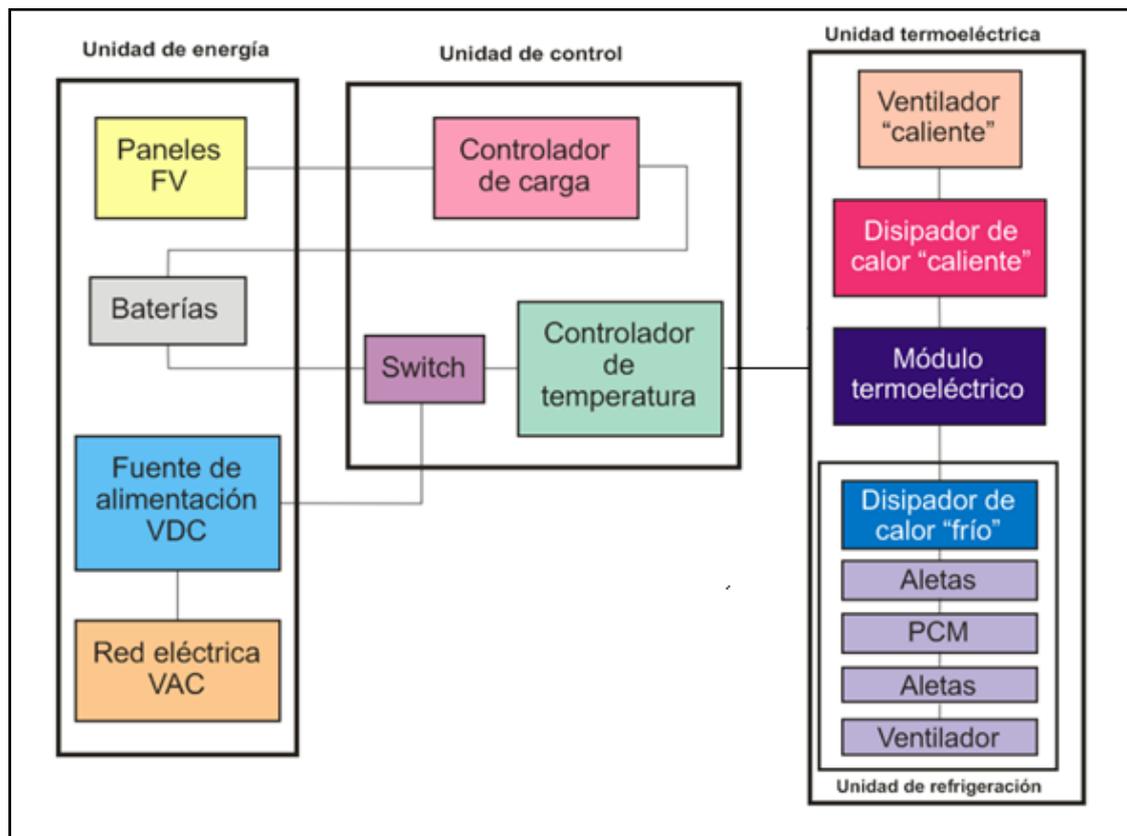


Figura 5. Diagrama de componentes del sistema de refrigeración seleccionado- Alternativa 6.

5.2.3.2 Modelo de la configuración final del sistema en 3D

Se elaboró una representación tridimensional de la estructura física general del sistema de refrigeración (Figura 6) con el fin de comunicar visualmente el concepto seleccionado y mostrar la ubicación de los componentes principales en el prototipo.

En particular se muestra la geometría de los ensambles termoelectricos y los componentes que los constituyen, también se indica la posición que tendrán en el refrigerador. En el Anexo 16 se incluyen imágenes que describen gráficamente la configuración seleccionada.

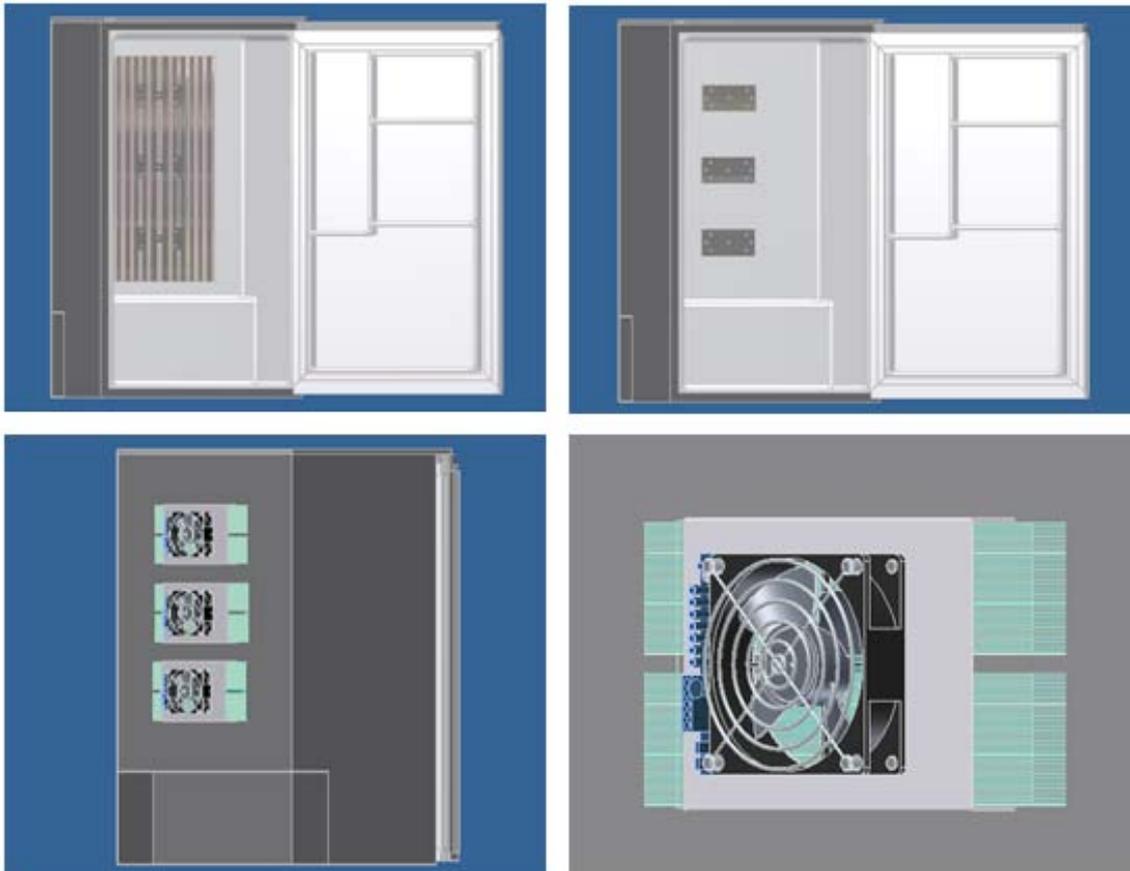


Figura 6. Configuración final del sistema de refrigeración.

5.3 ETAPA 3: DISEÑO DE DETALLE

El diseño de detalle del dispositivo de enfriamiento propuesto comprende las siguientes actividades:

- Cálculo de la carga térmica del sistema.
- Cálculo del número de ensambles termoeléctricos.
- Cálculo de las dimensiones del contenedor de PCM.
- Cálculo del número de aletas del contenedor de PCM.
- Dimensionamiento del sistema fotovoltaico: paneles solares, baterías, controlador de carga y cables.

Asimismo se realizó la selección de los componentes que por funcionalidad, capacidad y precio se adaptaron a la configuración del sistema de enfriamiento del dispositivo.

5.3.1 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

5.3.1.1 Cálculo de la carga térmica

Para el cálculo de la carga térmica teórica del sistema, se consideraron los siguientes tipos de carga:

- a) Carga por transmisión
- b) Carga por infiltración
- c) Carga por almacenamiento térmico
 - Por calor sensible de congelación
 - Por calor latente de congelación
- d) Carga por enfriamiento y/o congelación de los alimentos

Se asumió que el dispositivo de enfriamiento va a operar bajo la sombra, ya que como se estableció en los requerimientos, será de uso doméstico. Por lo tanto, las ganancias de calor debido al efecto solar (radiación) no se tomaron en cuenta. Para realizar el cálculo de la carga térmica se utilizaron los datos que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos utilizados para el cálculo de la carga térmica.

Datos de entrada		Unidades
Temperatura exterior e interior del refrigerador		°C
Humedad relativa del aire		%
Presión atmosférica		Pa
No. de aperturas promedio de la puerta		-
Dimensiones del refrigerador : alto, ancho y fondo		mm
Paredes del refrigerador	-Espesor	mm
	-Coeficiente de conductividad	W/m°C
	-Temperatura requerida en el interior del refrigerador	°C
Sustancia que realizará la función de almacenamiento térmico	Masa por día	Kg
	Calor latente de congelación	(kJ/kg)
	Calor específico por debajo del punto de congelación	kJ/kg°K
	Temperatura de congelación	°C
	Temperatura requerida en el interior del refrigerador	°C
Producto a refrigerar	Masa por día	kg
	Calor específico por encima del punto de congelación	kJ/kg°K
Factor de seguridad	%	

El cálculo de la carga térmica se realizó para un dispositivo que sólo funcionará como enfriador, y se consideró una temperatura mínima de enfriamiento de 4°C.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la carga térmica por transmisión, infiltración, almacenamiento térmico y alimentos calculados de manera teórica. El valor del coeficiente de convección utilizado para realizar los cálculos se obtuvo a partir de la información publicada por la Norma Básica de Edificación (NBE).

Tabla 4. Resultados de la carga térmica del dispositivo de enfriamiento.

Símbolo	Carga térmica	W
$q_{\text{transmisión}}$	Por conducción a través de las paredes y puerta del refrigerador	32,02
$q_{\text{infiltración}}$	Por infiltración (apertura de puertas)	1,07
q_{at}	Por almacenamiento térmico (latente y sensible)	8,18
$q_{\text{alimentos}}$	Por alimentos	13,5
q_{total}	Carga térmica total (para un periodo de 24 hrs)	60,27

En el Anexo 17 se muestra a detalle el procedimiento que se siguió para el cálculo de la carga térmica, así como las fórmulas utilizadas. En el Anexo 18 se incluye una hoja de cálculo en donde se muestran los resultados obtenidos, y en donde es posible modificar los datos de entrada en caso de que sea necesario.

Con el fin de verificar los resultados obtenidos de la carga térmica calculada con los coeficientes establecidos por la NBE (Melgarejo, 1995), se realizó el cálculo de la carga térmica utilizando los valores de los coeficientes de convección propuestos por General Electric (GE) y por el Centro de Investigación en Energía (CIE).

En la Tabla 5 se presenta el porcentaje de error de la carga térmica tomando como referencia la carga térmica obtenida a partir de los datos de la NBE y posteriormente comparada consigo misma y con la carga obtenida a partir de los valores propuestos por GE y por el CIE. También se tomaron como referencia los valores obtenidos con los datos de GE y del CIE, y se realizaron sus respectivas comparaciones.

Tabla 5. Porcentaje de error de la carga térmica.

Referencia / Comparación	Porcentaje de error (%)		
	NBE	GE	CIE
NBE	0	4,87	14,02
GE	4,87	0	9,61
CIE	14,02	9,61	0

 % de error mínimo – valores proporcionados por GE.

Como se puede observar el valor del coeficiente de convección utilizado (proporcionado por la NBE) para el cálculo de la carga térmica con respecto al proporcionado por GE tiene un porcentaje de error del 4,8%, por lo que los resultados obtenidos de la carga térmica no presentan una variación significativa. En el Anexo 19 se pueden consultar los resultados de la variación de la carga térmica de acuerdo con el coeficiente de convección utilizado.

5.3.1.2 Cálculo del número de ensambles termoeléctricos

Para el cálculo del número de ensambles termoeléctricos del sistema de refrigeración se analizaron dos marcas (Laird Technologies¹² y TE Technology¹³) y se revisaron veintidós modelos de ensambles termoeléctricos correspondientes al tipo de contacto directo. El procedimiento que se siguió para la selección de la cantidad de ensambles termoeléctricos para una carga térmica de 60 W se presenta a continuación:

1. En primer lugar se calculó el diferencial de temperatura (ΔT) entre la temperatura del ambiente y la temperatura de placa fría deseada.
2. Posteriormente se calculó la eficiencia de los ensambles termoeléctricos con base en la información proporcionada por los distribuidores de dichos componentes (nomogramas de eficiencia), la cual se encuentra disponible en medios electrónicos.
3. A continuación se calculó la potencia de enfriamiento (capacidad de remoción de la carga térmica del sistema) de los ensambles termoeléctricos correspondientes al diferencial de temperatura (ΔT) obtenido en el punto 1.
4. En seguida se calculó el número de ensambles termoeléctricos con base en la carga térmica calculada con anterioridad; ésta última se dividió entre la potencia de enfriamiento correspondiente al diferencial de temperatura (ΔT) obtenido en el punto 1.
5. Finalmente se calculó el voltaje y corriente requeridos por los ensambles termoeléctricos.

El procedimiento detallado del cálculo del número de ensambles termoeléctricos para cada marca y modelo analizados se puede consultar en el Anexo 20. En el Anexo 21 se incluye una hoja de cálculo en donde se muestran los resultados obtenidos, y en donde es posible modificar los datos de entrada en caso de que sea necesario.

¹² Laird Technologies. *Thermoelectric assemblies*. [Online]. Disponible en: <http://www.lairdtech.com/Products/Thermal-Management-Solutions/Thermoelectric-Assemblies> [Fecha de acceso: agosto de 2009].

¹³ Te Technolgy, Inc. *Cold plates*. [Online]. Disponible en: <http://www.tetech.com/> [Fecha de acceso: agosto de 2009].

En la Tabla 6 se muestran los resultados de modelos de ensambles termoeléctricos considerados para la configuración del sistema de refrigeración. Los resultados consisten en la potencia de enfriamiento máxima, consumo energético (potencia de entrada), voltaje, corriente y número de los ensambles termoeléctricos requeridos para el sistema de refrigeración.

Tabla 6. Ensamblés termoeléctricos considerados para el sistema de refrigeración.

Ensamblés termoeléctricos	Modelos		
	AA-040-12-22	AA-060-12-22	AA-100-24-22
Número de ensambles requeridos	4	3	2
Potencia de enfriamiento máxima (W)	60	60	60
Voltaje requerido (V)	48	36	48
Potencia de entrada (W)	302,4	223,2	268,8

5.3.1.3 Cálculo de las dimensiones del contenedor PCM

El dimensionamiento del contenedor de PCM se realizó en función de su ubicación dentro del dispositivo de enfriamiento y propiedades térmicas del PCM. Por otro lado, la selección de la geometría y del PCM se hizo en función de la disponibilidad comercial, facilidad de construcción, tiempo de elaboración y costo.

Se realizaron cálculos de dimensionamiento para tres posiciones diferentes del contenedor en el interior del dispositivo de enfriamiento:

1. Cubriendo tres paredes del dispositivo de enfriamiento (dos laterales y una trasera).
2. Cubriendo únicamente la pared trasera del dispositivo de enfriamiento.
3. Cubriendo únicamente la pared superior del dispositivo de enfriamiento.

Para definir las dimensiones del contenedor de PCM, se calcularon los siguientes parámetros:

1. Masa del material de cambio de fase requerido como almacenamiento térmico. En la Tabla 7 se muestran los parámetros utilizados para el cálculo de la masa del material de cambio de fase:

Tabla 7. Parámetros utilizados para el cálculo de la masa del PCM.

Parámetros	Unidades
Calor latente del PCM ¹⁴	J/kg
Energía térmica acumulada en el PCM	J
Tiempo de autonomía que se pretende tener de la red eléctrica convencional	s
Carga térmica que se pretende remover del sistema de refrigeración	W

- Una vez que se calculó la masa del PCM, se obtuvo el volumen del contenedor del material de cambio de fase. Los parámetros utilizados para su cálculo se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros utilizados para el cálculo del volumen del contenedor de PCM.

Parámetros	Unidades
Masa del PCM	kg
Densidad del PCM ¹⁵	m ³

- Por último se establecieron las dimensiones lineales del contenedor: largo y ancho, los cuales estuvieron restringidos por las dimensiones del interior del dispositivo de enfriamiento, por lo tanto el espesor del contenedor fue una variable dentro del cálculo.

El procedimiento y los resultados del cálculo de las dimensiones del contenedor se pueden consultar en el Anexo 22 con mayor detalle.

5.3.1.4 Cálculo del número de aletas del contenedor de PCM

El dimensionamiento del número de aletas del contenedor del material de cambio de fase necesarias para remover la carga térmica del dispositivo de enfriamiento, se calculó con los parámetros indicados en la Tabla 9. La selección de la geometría y material de las aletas, se realizó en función de la disponibilidad comercial, facilidad de construcción, tiempo de elaboración y costo.

¹⁴ Se tomó como referencia el valor de la densidad del agua =1000 kg/m³ a 5°C y presión de saturación.

¹⁵ ídem.

Tabla 9. Parámetros utilizados para el cálculo del número de aletas del contenedor de PCM.

Parámetros	Unidades
Espesor del contenedor de PCM	mm
Dimensiones lineales (largo y ancho) de la pared transversal del contenedor de PCM	mm
Dimensiones lineales de la sección transversal de la aleta (altura, largo y espesor)	mm
Coefficiente de conducción del material del contenedor de PCM	W/mK
Coefficiente de conducción del material de las aletas del contenedor de PCM	W/mK
Temperatura de la superficie aletada	°C
Temperatura del ambiente en el interior del dispositivo de enfriamiento	°C
Coefficiente de película	W/m ² K

El procedimiento y los resultados del cálculo de las aletas del contenedor se pueden consultar en el Anexo 23 con mayor detalle.

5.3.1.5 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se tomó como base el procedimiento publicado en el manual *“Photovoltaics: Design and Installation”* (Solar Energy International 2008). La estimación de la cantidad de baterías, paneles fotovoltaicos, especificaciones del controlador de carga y calibre del cable para las conexiones del sistema se realizó en el siguiente orden:

1. Cálculo del número de baterías
2. Cálculo del número de paneles fotovoltaicos
3. Determinación de las especificaciones para la selección del controlador de carga.
4. Cálculo del calibre del cable para la instalación fotovoltaica.

Los parámetros necesarios para calcular el número de baterías se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros utilizados para el cálculo del número de baterías.

Parámetros	Unidades
Carga del equipo (consumo energético del dispositivo de enfriamiento)	W
No. de horas de funcionamiento promedio de la carga con baterías	h
Carga promedio diaria AC	W
Eficiencia del inversor	%

Tabla 10. Parámetros utilizados para el cálculo del número de baterías.

Parámetros	Unidades
Voltaje del sistema VDC	V
No. de días de autonomía	días
Límite de descarga de las baterías	%
Capacidad de las baterías	Ah
Voltaje de las baterías	V

El cálculo del número de paneles fotovoltaicos para el sistema de refrigeración incluyó el análisis de dos marcas: Condumex¹⁶ y Kyocera¹⁷. De la marca Condumex se analizaron siete modelos correspondientes a paneles fotovoltaicos monocristalinos y uno amorfo; de la marca Kyocera se analizaron nueve modelos correspondientes a paneles fotovoltaicos policristalinos (Anexo 24). Los parámetros necesarios para calcular el número de paneles fotovoltaicos se muestran en las Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros utilizados para el cálculo del número de paneles fotovoltaicos.

Parámetros	Unidades
No. aproximado de horas pico de irradiación solar al día	h
Corriente a potencia pico nominal de los paneles fotovoltaicos (IPP _n)	A
Corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico (I_{cc})	A
Voltaje a potencia pico nominal (V_{PPn})	V
Eficiencia de las baterías	%
Voltaje nominal del dispositivo de enfriamiento	V
Voltaje nominal del módulo fotovoltaico	V
Módulos fotovoltaicos conectados en paralelo	-
Promedio de Ah/día del dispositivo de enfriamiento	Ah/día

De igual manera los parámetros requeridos para la selección del controlador de carga, así como para el cálculo del calibre del cable para la instalación del sistema fotovoltaico se muestran en las Tablas 12 y 13.

Tabla 12. Parámetros requeridos para la selección del controlador de carga.

Parámetros	Unidades
Corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico (I_{cc})	A
No. de módulos fotovoltaicos conectados en paralelo	-
Carga total del sistema	W
Voltaje del sistema	V
Factor de seguridad	%

¹⁶ Microm. *Módulos fotovoltaicos*. [Online]. Disponible en: <http://www.microm.com.mx/> [Fecha de acceso: septiembre de 2009].

¹⁷ Kyocera Solar Inc. *Product Catalog*. [Online]. Disponible en: <http://www.kyocerasolar.com/pdf/catalog/Modules.pdf> [Fecha de acceso: agosto de 2009].

Tabla 13. Parámetros utilizados para el cálculo del calibre del cable de la instalación fotovoltaica.

Parámetros	Unidades
Voltaje a potencia pico nominal (V_{PPn})	V
Carga total del sistema	W
Longitud del cableado de la instalación	A
Corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico (I_{cc})	A
Temperatura ambiente	°C

En el Anexo 25 se muestra a detalle el procedimiento que se siguió para el cálculo del sistema fotovoltaico. Este anexo es una hoja de cálculo en donde se muestran los resultados obtenidos y en donde es posible modificar los datos de entrada en caso de que sea necesario.

5.3.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES

La selección de los componentes principales del sistema se realizó con base en los resultados obtenidos para la carga térmica, número de ensamblajes termoeléctricos, paneles fotovoltaicos, baterías y controlador de carga necesarios para el funcionamiento del dispositivo de enfriamiento; además de los resultados relacionados con las dimensiones y número de aletas del contenedor de PCM. En la Tabla 14 se muestran los componentes de cada unidad del sistema de enfriamiento y una breve descripción de cada uno de ellos.

Tabla 14. Componentes seleccionados para el sistema de refrigeración.

Unidad	Componentes	Descripción
Energía	- Paneles fotovoltaicos	Policristalinos, 180 W
	-Baterías	115 Ah, 12 V, libre de mantenimiento, vida útil de 3 a 4 años
Control	-Fuente de alimentación VDC	Conmutada de 24 V, 20 A
	-Controlador de temperatura	On / Off
	-Controlador de carga	De estado sólido 24 V, 40 A
	-Switch	-
Termoeléctrica	-Ensamblajes termoeléctricos	24 V, 4.6 A de contacto directo
Refrigeración	-Contenedor de PCM	Material: aluminio, calibre 18
	-PCM	Gel refrigerante

Se elaboraron fichas descriptivas (Anexo 26) de dispositivos comerciales de diversas marcas y modelos para la selección de los componentes principales del sistema de refrigeración. En el Anexo 27 se pueden consultar las marcas y especificaciones de los componentes seleccionados.

5.4 ETAPA 4: CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

5.4.1 DESCRIPCIÓN

5.4.1.1 Aspectos generales

El prototipo objeto de este trabajo de investigación es un dispositivo de enfriamiento cuya capacidad volumétrica es de 3.8 cu.ft. De este dispositivo fue desmontado el sistema de refrigeración tradicional compuesto por un condensador, evaporador, válvula de expansión, compresor y el controlador de temperatura, dejando solamente el gabinete en el cual se implementó el sistema propuesto (Consultar sección 5.2.3).

El dispositivo se caracteriza principalmente por el uso de ensamblajes termoeléctricos, cuyo funcionamiento se basa en el principio de Peltier. Este principio consiste en hacer pasar una corriente procedente de una fuente de energía eléctrica continua, a través de un circuito formado por dos conductores de distinta naturaleza, obteniéndose que una de sus uniones absorbe calor (enfriamiento) y la otra lo cede (calentamiento) (Cengel y Boles 1996).

Para la evaluación del prototipo se tomó como base la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2002¹⁸. En particular se hizo hincapié en los apartados relacionados con la clasificación del refrigerador, especificaciones y método de prueba, ésta última incluye la instrumentación que el equipo debe utilizar para realizar las pruebas.

En el diseño se aplicó una instrumentación cuya plataforma de hardware estuvo conformada por termopares tipo T y sensores LM35 para la medición de temperatura, además se utilizó un wathorímetro para la medición de potencia, voltaje y corriente del prototipo. El proceso de adquisición de datos se llevó a cabo utilizando los módulos NI cDAQ 9211 y NI cDAQ 9213 para medir señales de temperatura generadas por los termopares. Asimismo se utilizó un módulo NI SCC-68 para medir señales de voltaje generadas por los sensores de temperatura LM35, todos los módulos empleados pertenecen a la marca National Instruments. El registro y la visualización gráfica de los datos generados se realizó a través del software de instrumentación virtual LabVIEW versión 8.6 instalado en una computadora personal.

¹⁸ Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado. Secretaría de energía. *Normas Oficiales Mexicanas-Eficiencia energética*. [Online]. Disponible en: <http://www.sener.gob.mx/webSener/portal/index.jsp?id=19>. [Fecha de acceso:septiembre de 2009]

5.4.1.2 Consideraciones de diseño

De acuerdo con lo expuesto en el apartado 6.1.3, los requerimientos de diseño establecidos para cumplir con las exigencias de la investigación se presentan a continuación.

a) Referencia para la evaluación del prototipo

La evaluación del prototipo debe de tomar como referencia lo establecido en el apartado 9 de la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2002. Este apartado hace referencia al método de prueba que se debe seguir para cumplir con los requerimientos generales durante la evaluación del consumo de energía y medición de temperaturas del dispositivo de enfriamiento.

b) Uso de energías renovables

La energía necesaria para la operación del dispositivo de enfriamiento se debe de obtener a partir de una fuente de energía renovable y de la red eléctrica convencional.

Para el funcionamiento del prototipo se decidió utilizar la energía solar para generar energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos. Sin embargo, para propósitos de este proyecto sólo se definieron los parámetros necesarios para la selección de los paneles fotovoltaicos y para la construcción y/o selección del dispositivo de control encargado del suministro de energía del sistema, ya que ello requiere una etapa de diseño electrónico y de control que no son contemplados como parte de los alcances de este trabajo.

c) Autonomía de la red eléctrica convencional

El dispositivo de enfriamiento debe de tener un tiempo de autonomía de la red eléctrica convencional.

Las propuestas que se establecieron para lograr la autonomía del sistema consisten en el uso de paneles fotovoltaicos para generar energía eléctrica a partir de la energía solar y el empleo de un PCM que actúe como almacenamiento térmico.

El proyecto se limitó al estudio del PCM para determinar y evaluar el tiempo de autonomía que le puede brindar al sistema. El material de cambio de fase consistió en un gel refrigerante que se encuentra comercialmente disponible y es utilizado principalmente para extender la vida en almacén de productos perecederos y para su transportación durante largos periodos de tiempo.

d) Tecnología disponible en el mercado

El prototipo se tiene que construir con materiales y componentes disponibles en el mercado nacional e internacional. Consecuentemente, para la instrumentación se seleccionó equipo de medición que estuviera comercialmente disponible, sin tener que recurrir al diseño y/o construcción de alguno de ellos.

e) Uso

El dispositivo de enfriamiento debe ser de uso doméstico. Se decidió que el dispositivo estaría dirigido al sector residencial. De esta forma, para la definición de los parámetros de diseño del dispositivo, se tomaron en cuenta aspectos que hacen referencia a las dimensiones, volumen, peso, carga térmica, capacidad de enfriamiento y consumo energético del prototipo propuesto.

f) Mantenimiento

Los componentes que integran al dispositivo de enfriamiento deben de utilizar materiales y componentes que sean de fácil mantenimiento. De igual manera se consideraron aspectos como la facilidad de transporte, desmonte y reparación.

5.4.2 PROTOTIPO DE PRUEBA

5.4.2.1 Materiales y equipo

Los materiales requeridos para la construcción del prototipo se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Materiales utilizados para la construcción del prototipo.

MATERIALES	
Cantidad	Descripción
1	Gabinete de un dispositivo de enfriamiento comercial de 3.8 cu.ft., material de aislamiento: poliuretano
3	Ensamblados termoeléctricos de contacto directo
-	Espuma de poliuretano expandible
-	Sellador elástico de poliuretano
-	Lámina de aluminio calibre 18
-	Perfiles de aluminio de uno y dos canales
3	Ventiladores centrífugos, 12 VDC, 0.28 A
8	Bolsas de gel refrigerante de 250 gr. c/u
1	Fuente de alimentación conmutada, 12 VDC, 1.5 A
1	Fuente de alimentación regulada de DC, voltaje variable 0 - 24 V, 15 A
2	Baterías recargables selladas, de ácido-plomo, de 6 V, 1 Ah

5. METODOLOGÍA

El equipo de medición utilizado durante las pruebas del prototipo para la medición de temperatura y consumo energético se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Equipo de medición utilizado durante las pruebas del prototipo.

EQUIPO DE MEDICIÓN	
Cantidad	Descripción
12	Termopares tipo T soldados en uno de sus extremos
3	Termopares tipo T embebidos y soldados en una masa de cobre en uno de sus extremos
15	Sensores de temperatura LM35
1	Módulo de adquisición de datos para medición de señales de temperatura con 16 canales de entrada con terminales tipo resorte. Modelo NI cDAQ 9213, Marca National Instruments
1	Chasis NI cDAQ-9174 para 4 módulos de E/S
3	Módulos de adquisición de datos para medición de señales de temperatura con 4 canales de entrada con terminales tipo tornillo. Modelo NI cDAQ 9211
1	Chasis NI cDAQ-9178 para 8 módulos de E/S
1	Módulo de adquisición de datos para medición de señales de voltaje de DC, Modelo NI SCC-68
1	Tarjeta de adquisición de datos PCI NI 6025E
1	Wattorímetro 120 VAC, 60 Hz 15 A, modelo Watts up? PRO, marca Electronic Educational Devices
1	Wattorímetro, modelo WT 110, marca Yokogawa Electric Corporation
1	Computadora personal
1	Termómetro digital en forma de pistola con apuntador láser y sensor infrarrojo que mide a distancia la temperatura, marca Steren, Modelo HER-425
1	Multímetro digital
-	Software de instrumentación virtual LabVIEW versión 8.6



Figura 7. Módulos de adquisición de datos para medición de señales de temperatura.

5. METODOLOGÍA



Figura 8. Chasis para módulos de adquisición de datos.

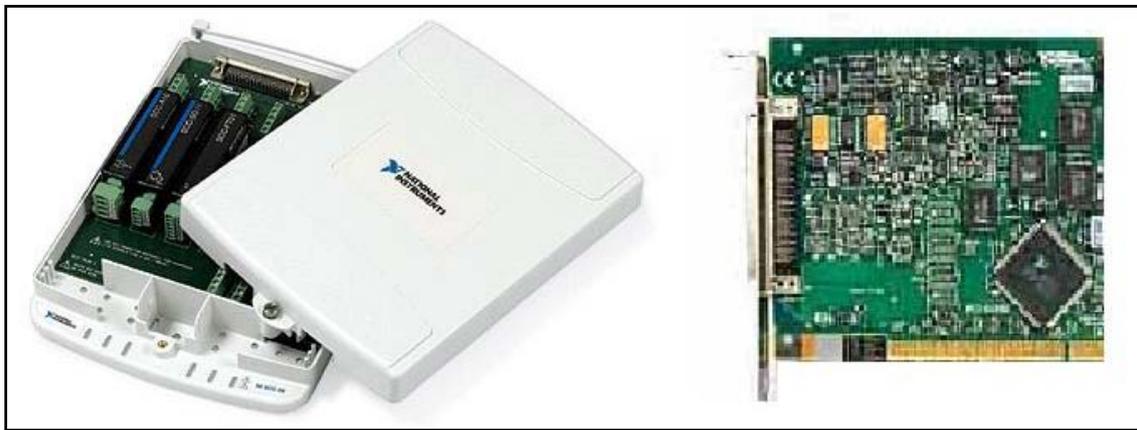


Figura 9. Módulo y tarjeta de adquisición de datos para medición de señales de voltaje.



Figura 10. Wathorímetros utilizados durante las pruebas del prototipo.



Figura 11. Termómetro infrarrojo y multímetro digital.

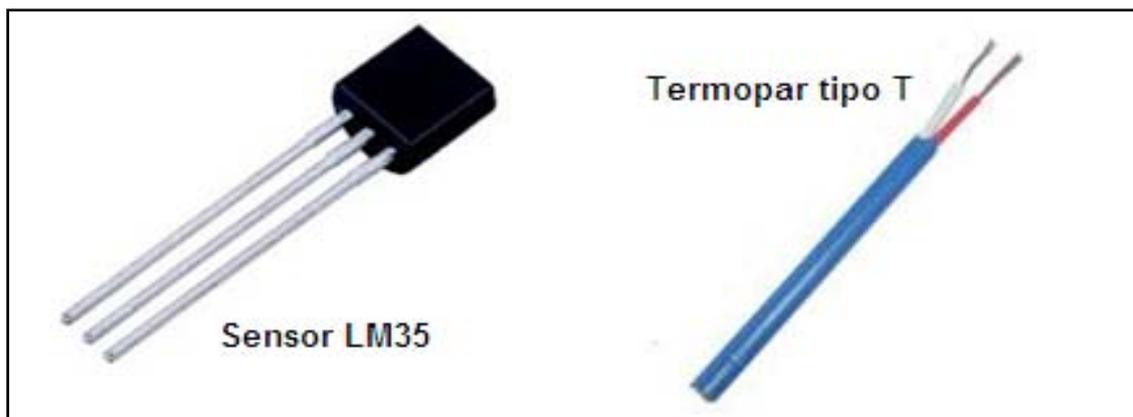


Figura 12. Sensor de temperatura LM35 y termopar tipo T.

5.4.2.2 Construcción del prototipo

a) Ensamblajes termoeléctricos

Se colocaron tres ensamblajes termoeléctricos en posición vertical distribuidos de manera uniforme en la pared trasera del gabinete del dispositivo de enfriamiento, la cual sirvió como una estructura de soporte para los mismos.

Para montar los ensamblajes termoeléctricos, fue necesario hacer cortes en la pared trasera del gabinete con la geometría y dimensiones de las placas frías para la pared interior y otros con las dimensiones y geometría de los disipadores de calor para la pared exterior (Foto 1). Para sellar los espacios entre los ensamblajes y la pared trasera del dispositivo se utilizó espuma de poliuretano comercial.



Foto 1. Etapas del proceso de corte en la pared trasera del dispositivo de enfriamiento para el montaje de los ensambles termoeléctricos.

La placa fría de cada ensamble termoeléctrico se direccionó hacia el interior del dispositivo de enfriamiento, de esta forma los disipadores de calor quedaron orientados hacia el exterior del gabinete (Foto 2).

Posteriormente se hicieron unos canales en la pared trasera exterior del gabinete, los cuales se ubicaron en los laterales verticales de los disipadores de calor para permitir la libre circulación del flujo de aire a través de las aletas. El aire es generado por los ventiladores que se encuentran colocados sobre cada uno de los disipadores de calor.



Foto 2. Ensamblados termoeléctricos montados en la pared trasera del dispositivo de enfriamiento.

b) Placa disipadora de calor

Se utilizó una placa disipadora de calor de aluminio calibre 18, la cual se colocó sobre las tres placas frías de los ensambles termoeléctricos (Foto 3). Para fijar la placa disipadora a las placas frías de los ensambles termoeléctricos se utilizaron tornillos que correspondían con la ubicación de los barrenos de las placas frías y de la placa disipadora de calor.

Entre las placas frías de los ensambles termoeléctricos y la placa disipadora de calor se colocó pasta térmica con el fin de incrementar la conductividad térmica entre ellas y rellenar espacios originados por la rugosidad de la superficie que influyen en la disminución del efecto de enfriamiento en la placa disipadora de calor.

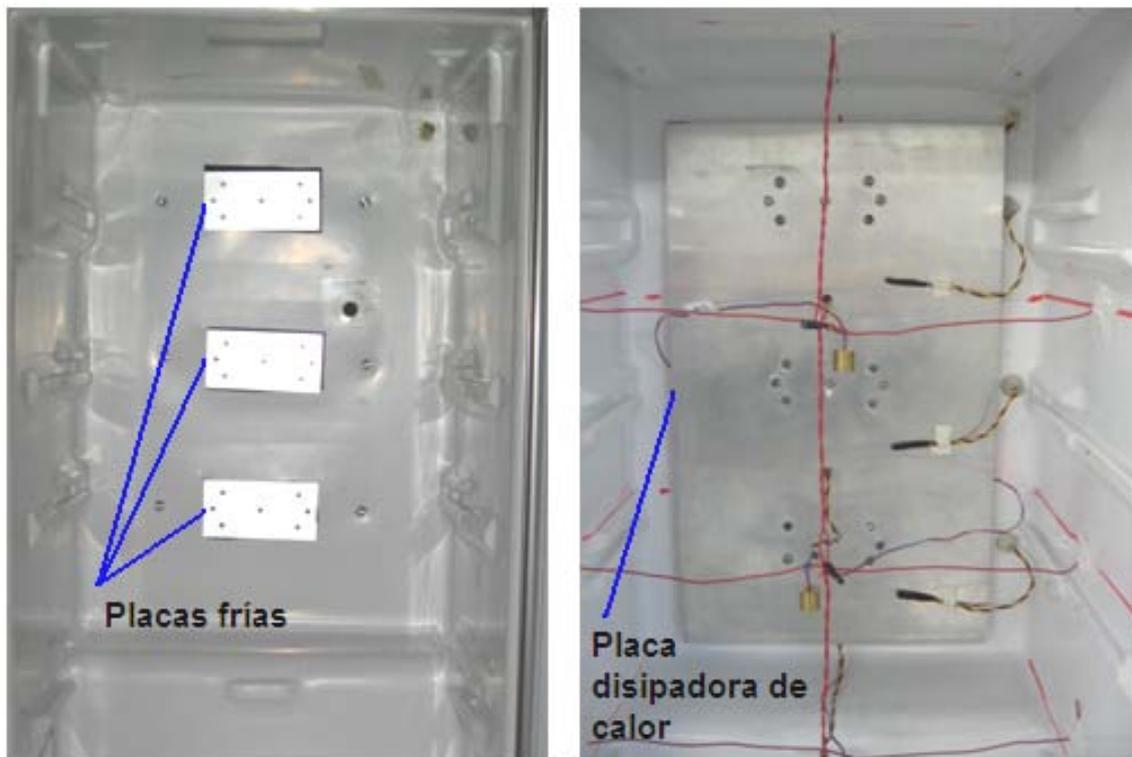


Foto 3. Placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos.

c) Contenedor del material cambio de fase

La manufactura del contenedor de material de cambio de fase, a pesar de su aparente simpleza, requirió cuidados especiales relacionados con su hermeticidad. El proceso de manufactura del contenedor comprendió soldadura, doblado, ensamble, carga y sellado del mismo.

5. METODOLOGÍA

El contenedor de cambio de fase está constituido por dos piezas: tapa y base. La tapa fue construida con seis perfiles de aluminio de dos canales y uno de un canal calibre 18, los cuales fueron soldados entre sí. Por otra parte, la base del contenedor se elaboró con una lámina de aluminio, calibre 18 (Foto 4).

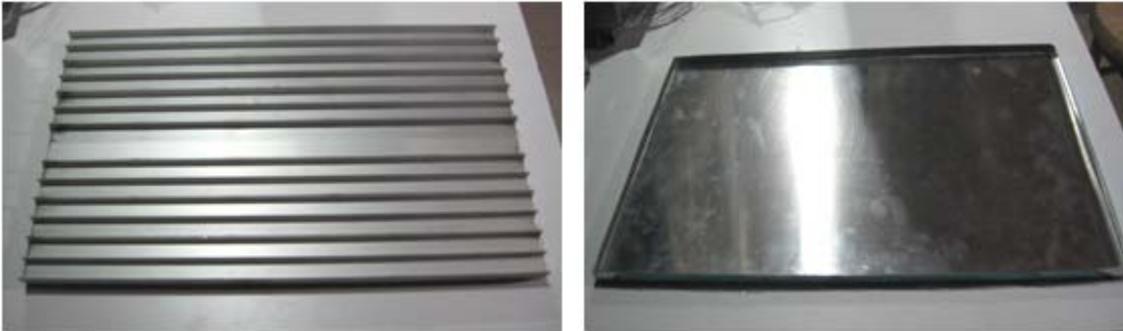


Foto 4. Tapa y base del contenedor del material de cambio de fase (PCM).

Se utilizó un sellador elástico de poliuretano para evitar fugas del material de cambio de fase y lograr la hermeticidad del contenedor. El sellador se colocó en las esquinas de la base del contenedor que fueron soldadas. En el caso de la tapa, el sellador se colocó en cada unión de los perfiles de aluminio y en las esquinas que requirieron de soldadura (Foto 5).



Foto 5. Esquinas y uniones de la base y tapa selladas con poliuretano.

Posteriormente se realizó la carga del material de cambio de fase en el contenedor. Una vez terminada la carga, se realizó el ensamble de las dos piezas (base y tapa), la cual consistió en la colocación de pijas en las pestañas laterales del recipiente.

El contenedor se montó de manera vertical sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos de tal forma que la base quedó en contacto directo con las placas frías. Por otro lado, la tapa del contenedor junto con las aletas quedaron expuestas hacia el interior del gabinete (Foto 6).

Para fijar el contenedor a las placas frías se utilizaron tornillos correspondientes con los barrenos de la tapa y la base del contenedor, los cuales coincidían con los ya existentes en las placas frías. Entre la base del contenedor y las placas frías se colocó pasta térmica con el fin de incrementar la conductividad térmica entre ellas y rellenar espacios originados por la rugosidad de la superficie, la cual disminuye el efecto de enfriamiento en la base del contenedor y por lo tanto en el material de cambio de fase contenido en el recipiente.

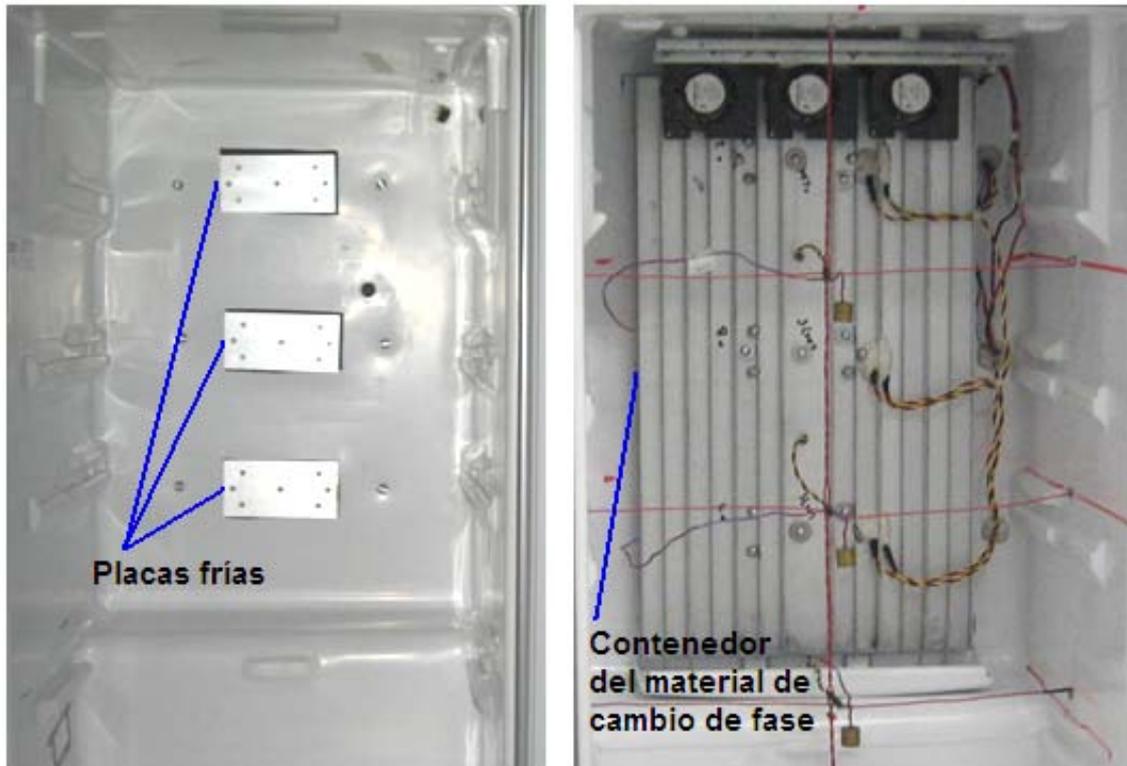


Foto 6. Contenedor del material de cambio de fase montado sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos.

d) Ventiladores centrífugos

Se colocaron tres ventiladores en la parte superior del interior del dispositivo de enfriamiento, de tal forma que la dirección del flujo de aire generado por los ventiladores fuera de arriba hacia abajo y recorriera la mayor área de superficie de la placa disipadora de calor o de la tapa (perfiles de aluminio soldados entre sí) del contenedor del material de cambio de fase, según la configuración a evaluar (Foto 7).

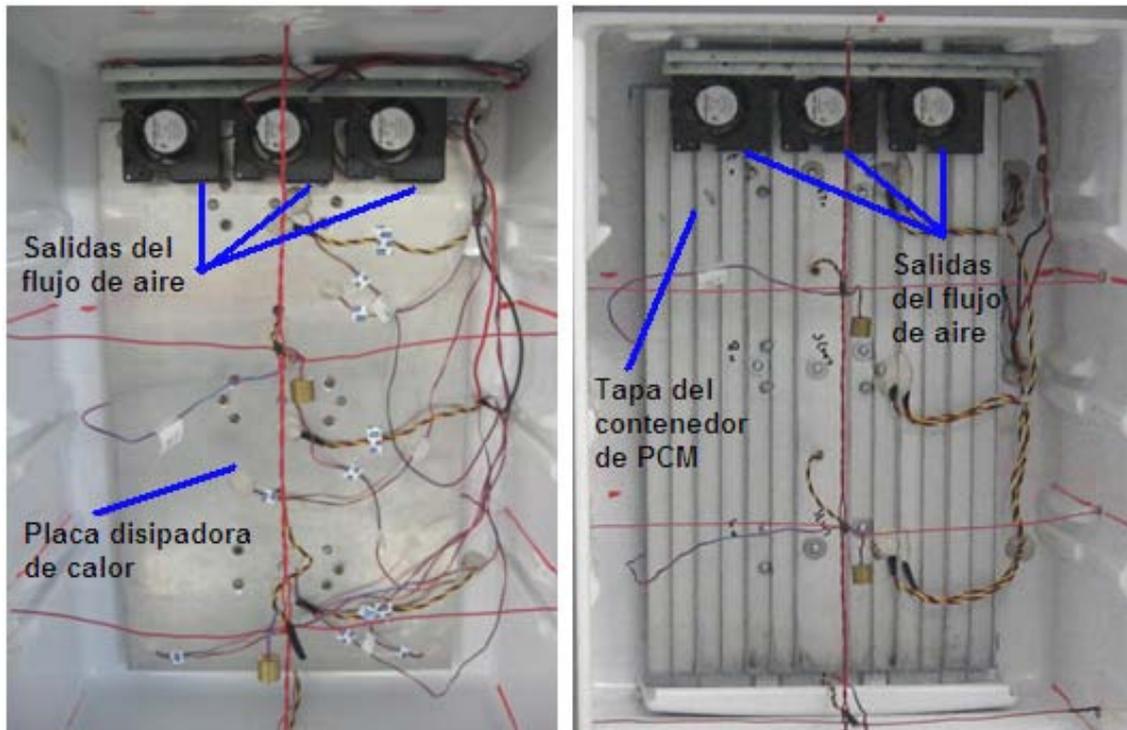


Foto 7. Ventiladores centrífugos colocados en la parte superior del interior del dispositivo de enfriamiento con la salida del flujo de aire direccionado hacia la sección inferior.

5.4.2.3 Instrumentación

a) Unidad de sensado

El sensado de la temperatura se realizó según lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2002 para dispositivos de enfriamiento convencionales clasificados como “solos”¹⁹, la cual indica que los termopares deben de estar embebidos en una de una masa de cobre o bronce para disminuir la variación de los valores de temperatura durante las mediciones.

De acuerdo con la norma, la distribución de los termopares consiste en colocar tres de ellos en el interior del congelador (C1, C2 y C3) y tres en la sección del enfriador (T1, T2 y T3)²⁰, tal y como se muestra en la Figura 13. Se utilizó la letra F para definir la altura de la sección del congelador, la letra H para hacer referencia a la altura de la sección del enfriador y P para el fondo del dispositivo.

¹⁹ La Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2002 clasifica a los refrigeradores y congeladores, de acuerdo con su tipo, en las siguientes categorías: refrigerador solo, refrigerador convencional, refrigerador congelador, congelador vertical y congelador horizontal. La clasificación de los refrigeradores depende del consumo de energía (E_{MAX}), volumen ajustado (VA) y factor de ajuste (FA). Para refrigeradores “solos”: $E_{MAX} = 248,4$ kWh/año, $VA = 0,31$ dm³, $FA = 1,00$.

²⁰ NOM-015-ENER-2002. Apéndice C: Colocación de sensores de temperatura en refrigeradores solos.

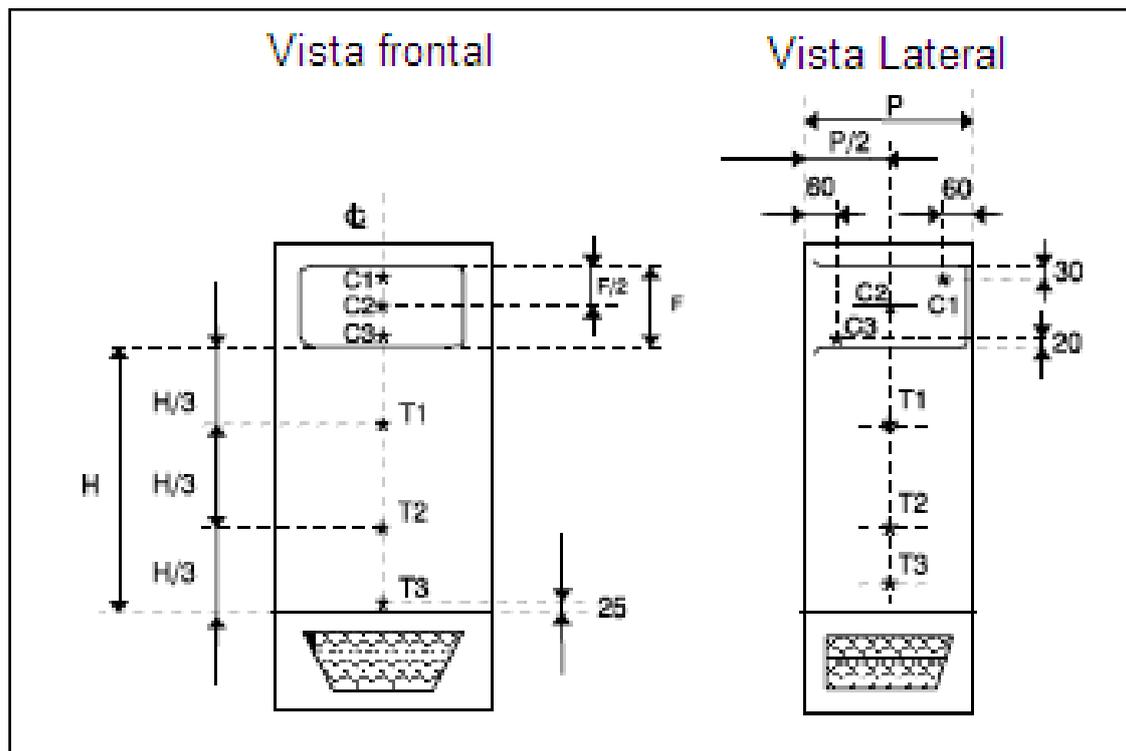


Figura 13. Distribución de los sensores de temperatura en el interior de un dispositivo de enfriamiento convencional "solo". Cotas: mm. Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2002 (Apéndice C).

Sin embargo, como el prototipo fue diseñado sin la sección del congelador, sólo se colocaron los tres termopares (T1, T2 y T3) correspondientes en la sección del enfriador. Cada uno de los termopares tenía un extremo embebido en una masa de cobre cilíndrica. Adicionalmente se colocaron tres sensores de temperatura LM35 (S1, S2 y S3) en la misma posición de los termopares (Foto 8).

En la Figura 14 se muestra un esquema con la distribución de los termopares en el interior del dispositivo de enfriamiento. Se utilizó la letra H para hacer referencia a la altura de la sección del enfriador y la letra P para el fondo del dispositivo.

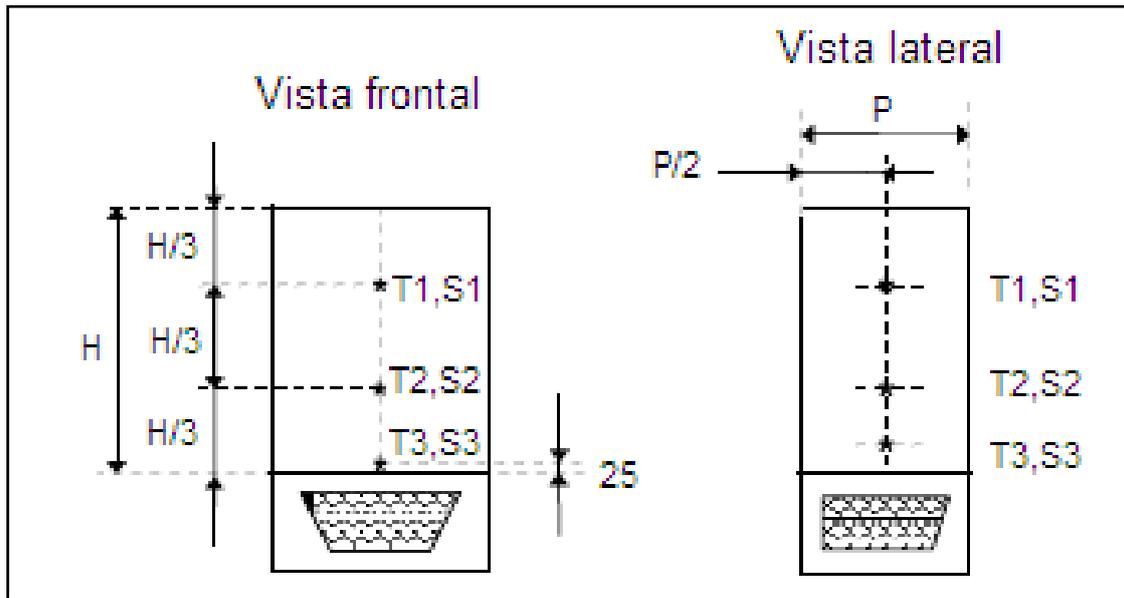


Figura 14. Distribución de los termopares y sensores de temperatura en el interior del prototipo. Cotas: mm.

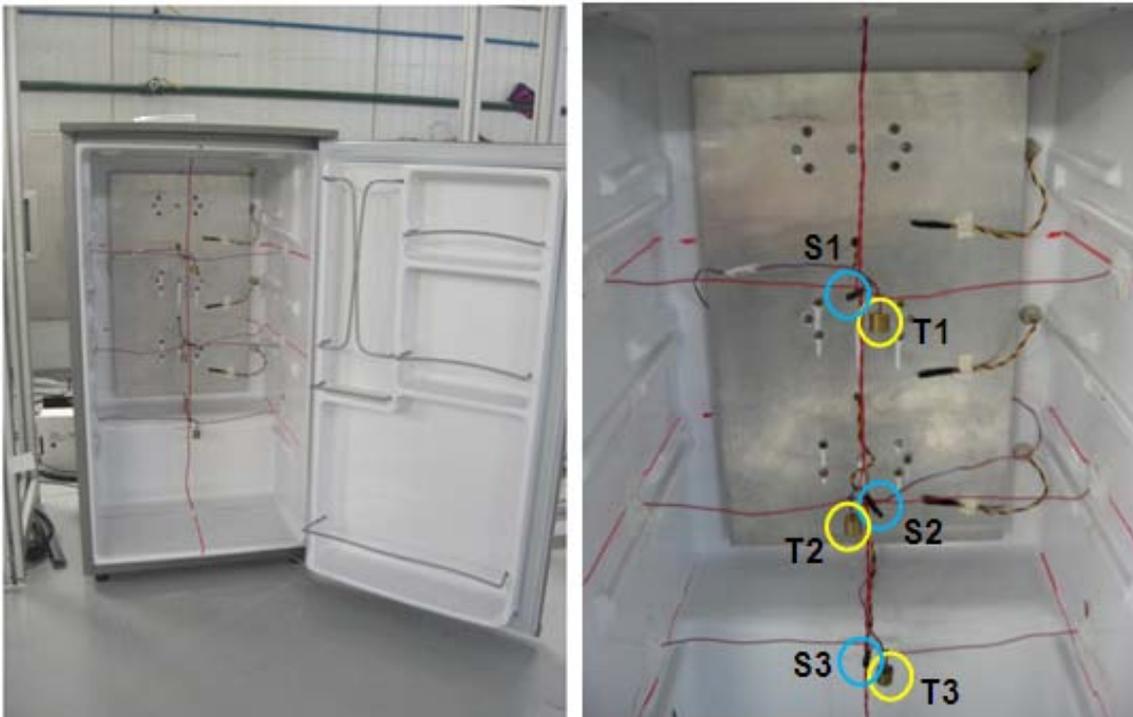


Foto 8. Termopares ($T1$, $T2$ y $T3$) embebidos en una masa de cobre y sensores de temperatura ($S1$, $S2$ y $S3$) colocados en el interior del prototipo.

- Sensores de temperatura LM35
- Termopares tipo J

Los sensores de temperatura LM35 son circuitos integrados de precisión que se caracterizan por tener un comportamiento lineal y cuyo factor de escala es de 10 mV/°C. La implementación de dichos sensores se hizo con el fin de corroborar las mediciones de temperatura del interior del dispositivo de enfriamiento realizadas con los termopares y determinar la variación de las mediciones obtenidas con cada tipo de sensor.

b) Unidad de monitoreo

La unidad de monitoreo estuvo integrada por un módulo de adquisición de datos para medición de señales de temperatura, modelo NI cDAQ 9213 con dieciséis canales de E/S analógicas. Posteriormente se utilizaron tres módulos modelo NI cDAQ 9211 con cuatro canales de E/S analógicas que sustituyeron al primero. Conjuntamente se utilizó un módulo de adquisición de datos para medición de señales de voltaje, modelo NI SCC-68. Todos los módulos de adquisición de datos utilizados pertenecen a la marca National Instruments (Foto 9).



Foto 9. Unidad de monitoreo de temperaturas.

Para monitorear el consumo energético se utilizó un wathorímetro de la marca Wattsup? PRO y posteriormente se utilizó otro perteneciente a la marca Yokogawa. Ambos instrumentos de medición proporcionaron datos de potencia, voltaje y corriente de entrada del prototipo. Para llevar a cabo la transferencia de los datos proporcionados por los wathorímetros a la computadora, se utilizaron cables con entrada USB y RS-232 (Foto10).

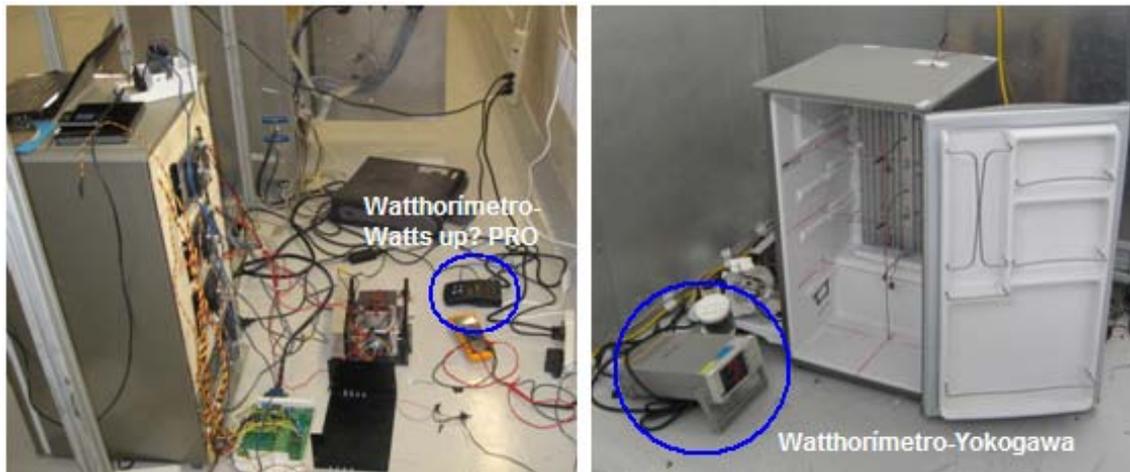


Foto 10. Unidad de monitoreo del consumo de energía del prototipo.

c) Unidad de procesamiento y despliegue

La unidad de procesamiento y despliegue del prototipo se implementó en una computadora personal que opera con un sistema operativo Windows XP, un procesador Intel Pentium II, 256 Mb de memoria RAM y 120 Gb de disco duro.

Las herramientas de software que se utilizaron para la medición de temperatura y voltaje fueron LabVIEW 8.6 de National Instruments y Logger Pro 3.8 de Vernier Software & Technology respectivamente.

El programa LabVIEW 8.6 se sincronizó con la unidad de monitoreo de temperaturas integrada por los módulos de adquisición de datos NI cDAQ 9211, NI cDAQ 9213 para la lectura de los datos de temperatura proporcionados por los termopares tipo T y el módulo NI SCC-68 para la lectura de los datos de voltaje proporcionados por los sensores de temperatura LM35.

El programa se diseñó para permitir el despliegue de las temperaturas de cada uno de los sensores LM35 y termopares colocados en el interior del dispositivo de enfriamiento, en la placa disipadora de calor, en el material de cambio de fase y en el contenedor del mismo; también muestra las temperaturas registradas en los disipadores de calor y placas frías de los ensambles termoeléctricos (Figura 15). Los datos obtenidos fueron almacenados y procesados mediante una hoja de cálculo.

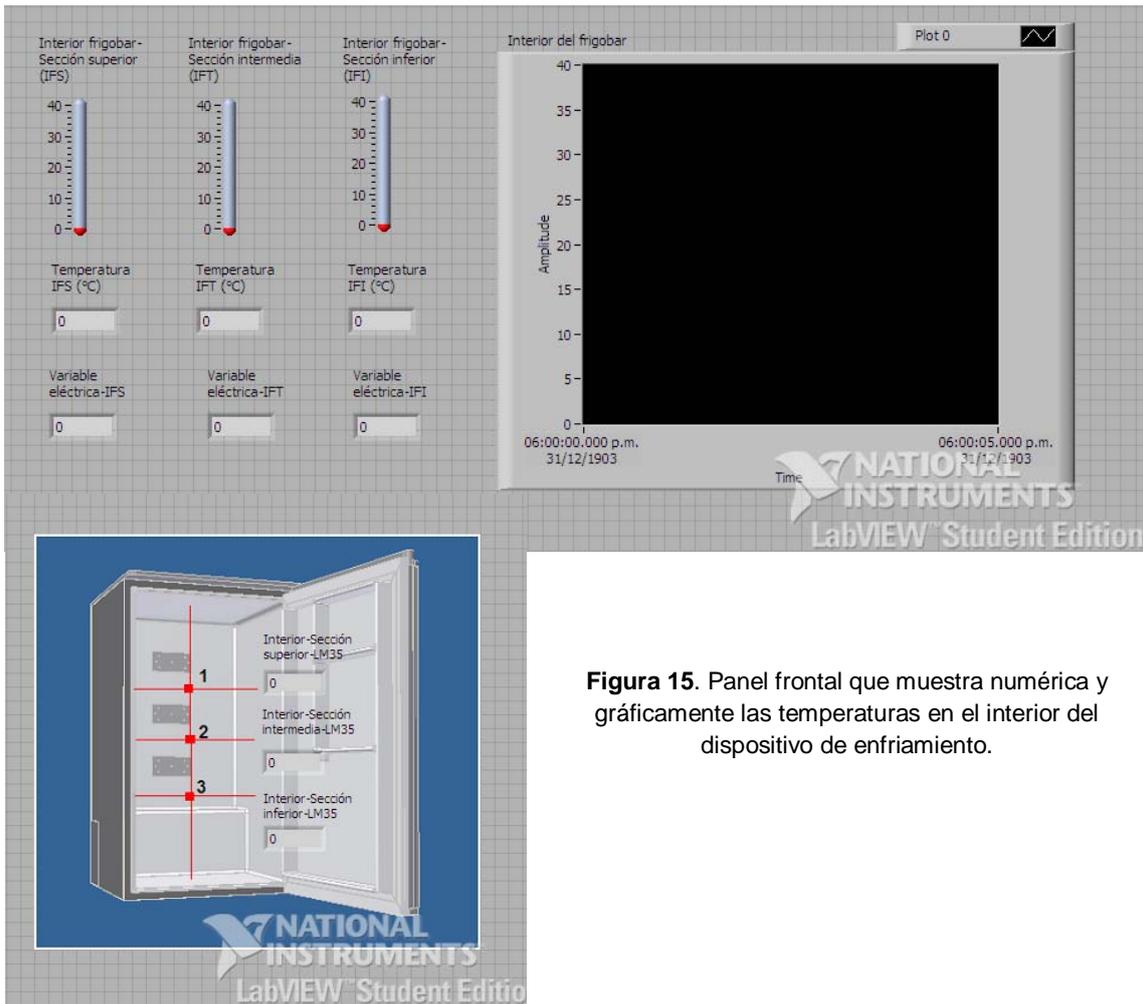


Figura 15. Panel frontal que muestra numérica y gráficamente las temperaturas en el interior del dispositivo de enfriamiento.

Por otro lado, el programa Logger Pro se sincronizó con la unidad de monitoreo de consumo eléctrico integrado por el wathorímetro Wattsup? PRO para la lectura de los datos de potencia, voltaje y corriente en tiempo real. Los datos resultantes fueron almacenados y procesados mediante una hoja de cálculo.

Las mediciones de temperatura, potencia, voltaje y corriente del prototipo se programaron para ser registradas en intervalos de un minuto por los instrumentos de medición.

5.4.2.4 Lugar de prueba

La primera etapa de las pruebas del prototipo se llevó a cabo del 27 de abril al 27 de mayo de 2010 en el laboratorio de refrigeradores del Centro de Tecnología y Proyectos de la empresa colaboradora en Querétaro, México.

Las cámaras contaban con un ambiente de temperatura y humedad controlado, las cuales registraban temperaturas de $32.2 \text{ }^\circ\text{C}$ con una humedad relativa de $20 \pm 5\%$ aproximadamente (Foto 11). La pared frontal exterior y la puerta de acceso de cada una de las cámaras se encontraban cubiertas con un material fabricado con fibra de vidrio que sirve como aislamiento térmico.

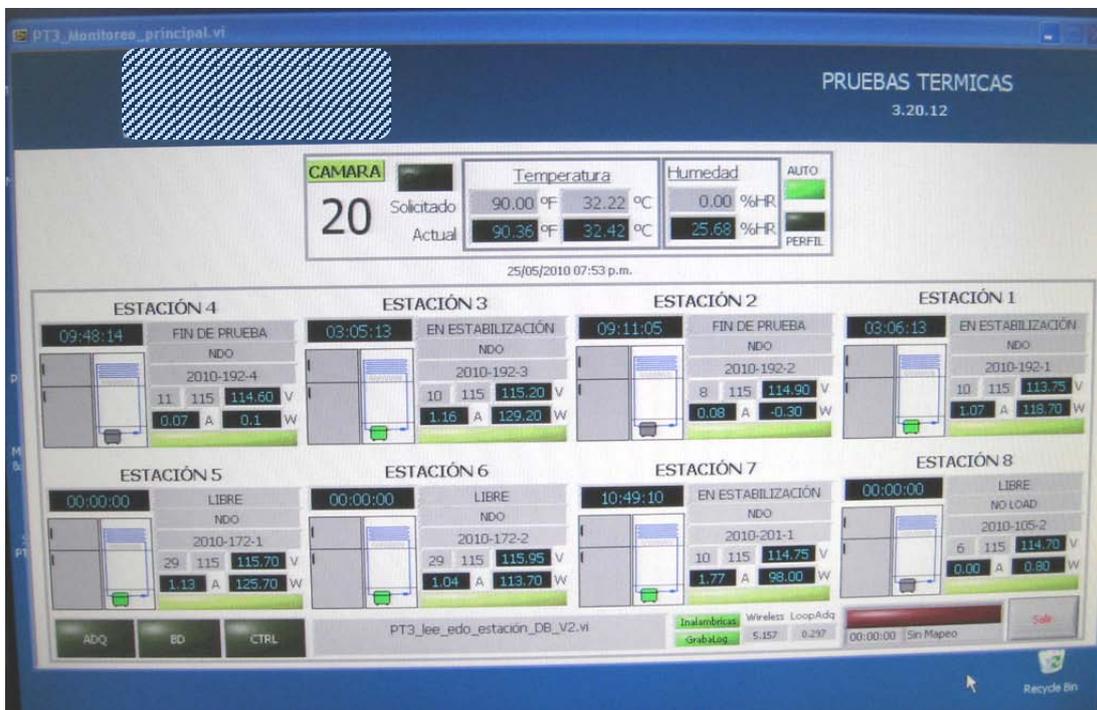


Foto 11. Pantalla de monitoreo de la cámara de pruebas térmicas No. 20.

El control de las cámaras de pruebas está basado en la norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2010, apartado 9.2.1, el cual establece que el ambiente del cuarto de prueba debe ser de $32.2 \pm 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ y se debe de mantener durante el periodo de estabilización al igual que durante las pruebas.

Las pruebas se realizaron en tres cámaras diferentes de pruebas térmicas (Foto 12). La variación del lugar de prueba se debió a situaciones relacionadas con la reparación y mantenimiento de las cámaras, disminución de la temperatura en su interior y por falta de estaciones disponibles para los elementos de prueba dentro de las cámaras.



Foto 12. Cámaras de pruebas térmicas de la empresa colaboradora en donde se llevaron a cabo las pruebas del prototipo.

5.5 ETAPA 5: PRUEBAS DEL PROTOTIPO

5.5.1 DESCRIPCIÓN

5.5.1.1 Aspectos generales del diseño de experimentos

El diseño de experimentos seleccionado se llevó a cabo con el fin de obtener la mayor cantidad de información válida acerca de la investigación, teniendo en cuenta el factor costo y el uso adecuado de los recursos disponibles. A continuación se describe de manera general el método experimental utilizado para la etapa de pruebas.

Las pruebas experimentales se fundamentaron en una estrategia conocida como experimentación secuencial (Riba 2002), la cual radica en partir de los resultados y análisis más favorables del primer experimento para determinar en qué van a consistir las variaciones de los siguientes. Lo anterior permite que el número de experimentos disminuya, ya que se llevan a cabo sucesivamente en la dirección de los resultados óptimos.

Este método no toma en cuenta las interacciones entre los factores controlables. Las interacciones hacen referencia a la dependencia de la variable de respuesta a partir de la variación de un factor que ya se había identificado en un inicio y de otro factor que se pensaba era ajeno a la variable de respuesta. En este estudio experimental, dado que las interacciones entre los factores controlables no son significativas, la aplicación de este método se consideró conveniente en la primera etapa de las pruebas.

En la Figura 16 se muestran los factores controlables del sistema de enfriamiento del dispositivo, así como la materia prima, factores de ruido y variables de respuesta (Gutiérrez y De la Vara 2008).

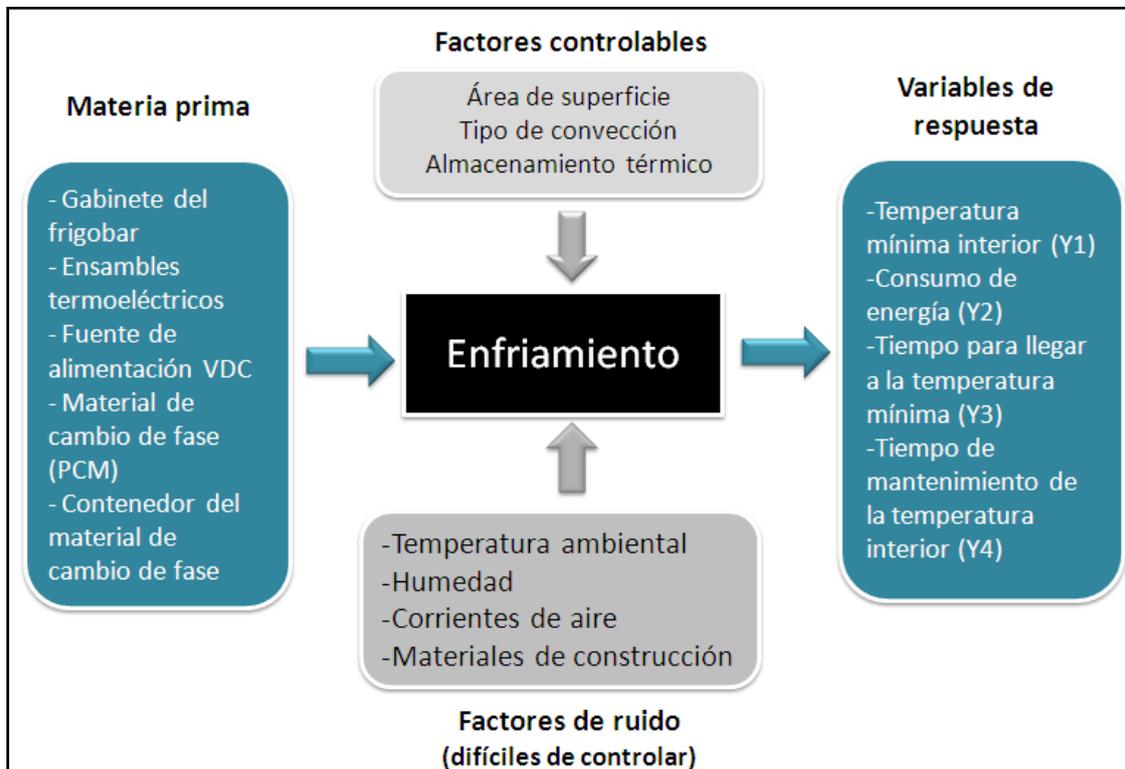


Figura 16. Factores y variables en el proceso de enfriamiento-Etapa 1.

5.5.1.2 Aplicación del diseño de experimentos al caso de estudio

El diseño de experimentos tenía como objetivo determinar las condiciones experimentales con las que se consiguiera un valor extremo en la(s) variable(s) de interés o respuesta. En este caso se requirió determinar la configuración a utilizar para el sistema de enfriamiento del dispositivo con la que se registrara la menor temperatura interior, el tiempo para llegar a la temperatura mínima y el tiempo de mantenimiento de la temperatura interior del dispositivo cuando no tenga una fuente de suministro de energía eléctrica para llevar a cabo el proceso de enfriamiento.

Los factores del sistema de enfriamiento del dispositivo que se controlaron durante las pruebas experimentales y que contribuyeron para determinar las variables de respuesta, se aplicaron en el siguiente orden (Figura 17):

- 1) Variación del área de superficie convectiva: se utilizaron dos superficies de área con diferentes dimensiones como medio de enfriamiento y una vez que se determinó si había un efecto en la variable de respuesta (temperatura interior del dispositivo de enfriamiento) con la modificación de este factor, entonces se seleccionó la opción con la que se obtuviera la menor temperatura y se prosiguió con la evaluación del siguiente factor controlable.
- 2) Tipo de convección (natural o forzada): una vez seleccionada el área de superficie convectiva, se hicieron pruebas variando el tipo de convección, es decir, utilizando la circulación natural del aire (natural) y la originada por ventiladores centrífugos (forzada) dentro del dispositivo de enfriamiento. Al igual que en el factor anterior, si se registró un efecto en la variable de respuesta (temperatura interior), entonces se seleccionó la opción con la que se obtuviera la menor temperatura y se continuó con la evaluación del siguiente factor controlable.
- 3) Uso de un contenedor de material de cambio de fase que sirviera como almacenamiento térmico: se realizaron pruebas utilizando un contenedor de PCM con las dimensiones de la superficie de área convectiva seleccionadas en el inciso 1 y el tipo de convección seleccionada en el inciso 2 y, si se observó un efecto en la variable de respuesta (temperatura interior y tasa de incremento de temperatura), entonces se seleccionó la opción con la que se obtuviera la menor temperatura y menor tasa de incremento de temperatura.

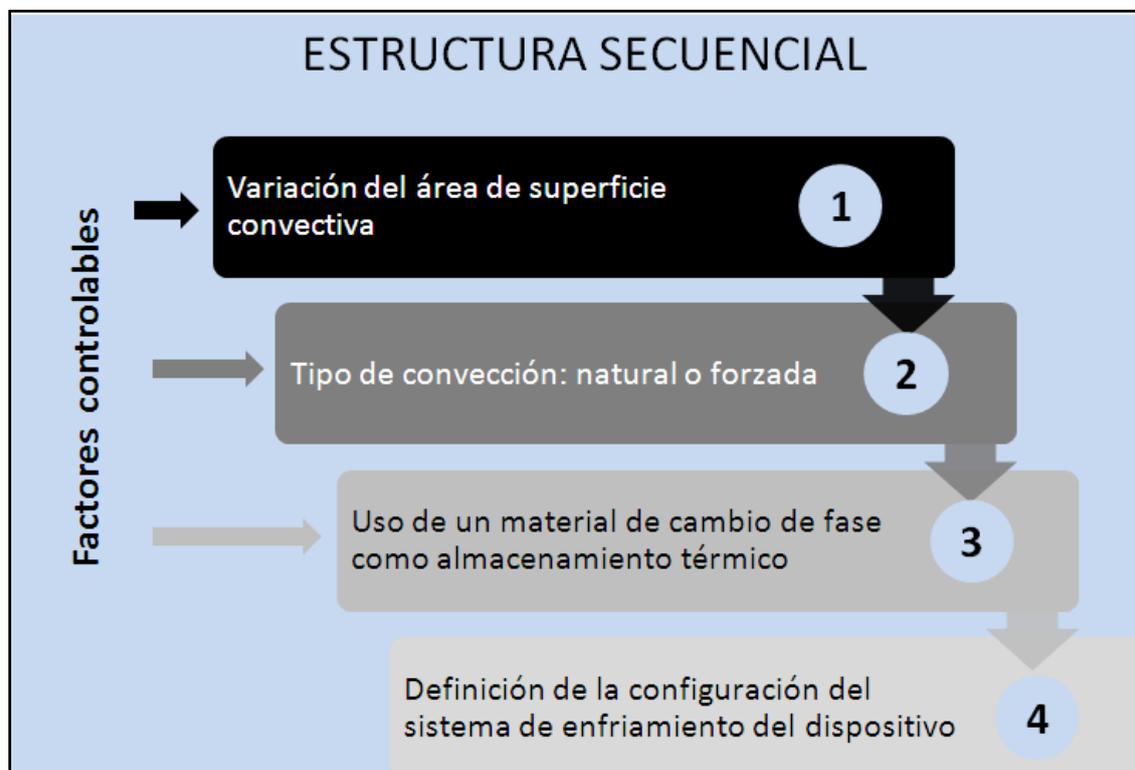


Figura 17. Método secuencial de pruebas para el prototipo.

La estructura secuencial utilizada para las pruebas del prototipo dio como resultado la construcción de cuatro configuraciones diferentes para el sistema de enfriamiento del dispositivo, las cuales se describen a continuación:

- Configuración 1: se utilizaron solamente las placas frías de los ensambles termoeléctricos como medio de enfriamiento. Tipo de convección: natural.
- Configuración 2: se utilizó una placa disipadora de calor con mayor área de superficie que las placas frías de los ensambles termoeléctricos y se colocó sobre ellas. Tipo de convección: natural.
- Configuración 3: se utilizó una placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. Tipo de convección: forzada.
- Configuración 4: se utilizó un contenedor de material de cambio de fase colocado sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. Tipo de convección: forzada.

5.5.1.3 Consideraciones generales para la preparación de las pruebas

A continuación se presentan las consideraciones principales que se tomaron en cuenta para llevar a cabo las pruebas del prototipo en la primera etapa del diseño de experimentos.

- 1) Las pruebas se realizaron utilizando el voltaje nominal de operación de los ensambles termoeléctricos.
- 2) Las pruebas del prototipo se llevaron a cabo a puerta cerrada.
- 3) Dada la duración de los experimentos y la necesidad de llevarlos a cabo en un mes de prueba, el máximo número de experimentos que se realizaron en la primera etapa del diseño de experimentos fue del orden de once.
- 4) Las once pruebas realizadas se dividieron en cuatro bloques correspondientes a las cuatro configuraciones descritas con anterioridad para el sistema de enfriamiento del prototipo. Se realizaron de dos a tres repeticiones por cada configuración.

5.5.2 PARÁMETROS EVALUADOS

Los parámetros que se midieron durante las pruebas están divididas en dos secciones, la primera sección muestra los datos de temperatura y consumo de energía obtenidos durante el proceso de enfriamiento, es decir cuando el dispositivo estaba en funcionamiento. La segunda sección presenta los datos obtenidos durante el proceso de calentamiento del interior del dispositivo, es decir cuando se detenía su funcionamiento.

Los parámetros evaluados durante el proceso de enfriamiento del dispositivo están constituidos por los datos que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Parámetros evaluados durante el proceso de enfriamiento.

Parámetro	Unidades
Periodo de total de prueba	s
Temperatura promedio mínima en las placas frías de los ensambles termoeléctricos	°C
Temperatura promedio mínima en el interior del dispositivo de enfriamiento	°C
Temperatura promedio máxima en los disipadores de calor	°C
Temperaturas mínimas en la sección superior, intermedia e inferior del interior del dispositivo de enfriamiento	°C
Temperaturas mínimas en la placa fría superior, intermedia e inferior de los ensambles termoeléctricos	°C
Temperaturas máximas en los disipadores de calor superior, intermedio e inferior de los ensambles termoeléctricos	°C
Temperatura promedio mínima del PCM	°C
Temperatura promedio mínima del contenedor de PCM: base, tapa y aletas	°C
Temperatura ambiente promedio	°C
Tiempo para llegar a la temperatura promedio mínima de las placas frías de los ensambles termoeléctricos	s
Tiempo para llegar a la temperatura promedio mínima en el interior del dispositivo de enfriamiento	s
Tiempo para llegar a la temperatura promedio máxima de los disipadores de calor	s
Consumo de energía real	W
Consumo de energía aparente	W
Corriente inicial, máxima, mínima y promedio	A
Voltaje inicial, máximo, mínimo y promedio	V

Los parámetros evaluados durante el proceso de calentamiento del dispositivo están constituidos por los datos que se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros evaluados durante el proceso de calentamiento.

Parámetro	Unidades
Periodo de total de prueba	s
Temperatura promedio máxima en las placas frías de los ensambles termoeléctricos	°C
Temperatura promedio máxima en el interior del dispositivo de enfriamiento	°C
Temperatura promedio mínima en los disipadores de calor	°C
Temperaturas máximas en la sección superior, intermedia e inferior del interior del dispositivo de enfriamiento	°C
Temperaturas máximas en la placa fría superior, intermedia e inferior de los ensambles termoeléctricos	°C
Temperaturas mínimas en los disipadores de calor superior, intermedio e inferior de los ensambles termoeléctricos	°C
Temperatura promedio máxima del PCM	°C
Temperatura promedio mínima del contenedor de PCM: base, tapa y aletas	°C
Temperatura ambiente promedio	°C
Tiempo para llegar a la temperatura promedio máxima de las placas frías de los ensambles termoeléctricos	s
Tiempo para llegar a la temperatura promedio máxima en el interior del dispositivo de enfriamiento	s
Tiempo para llegar a la temperatura promedio mínima de los disipadores de calor	s

5.5.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS CONFIGURACIONES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

A continuación se presentan las características principales de las configuraciones del sistema de enfriamiento del dispositivo que fueron implementadas en el prototipo durante la etapa de pruebas. Las configuraciones surgieron como resultado de la estrategia experimental utilizada.

5.5.3.1 Configuración 1

Medio de enfriamiento: placas frías de los ensambles termoeléctricos

Tipo de convección: natural

Parámetros monitoreados: temperatura (°C), voltaje (V), corriente (A) y potencia de entrada (W).

Cantidad de termopares utilizados: 3

Cantidad de sensores de temperatura LM35 utilizados: 9

No. de repeticiones de la prueba: 3

Pruebas 1, 2 y 3

5.5.3.2 Configuración 2

Medio de enfriamiento: placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos

Tipo de convección: natural

Parámetros monitoreados: temperatura (°C), voltaje (V), corriente (A) y potencia de entrada (W).

Cantidad de termopares utilizados: 9

Cantidad de sensores de temperatura LM35 utilizados: 9

No. de repeticiones de la prueba: 3

Pruebas 4, 5 y 6

5.5.3.3 Configuración 3

Medio de enfriamiento: placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos

Tipo de convección: forzada, se utilizaron 3 ventiladores centrífugos

Parámetros monitoreados: temperatura (°C), voltaje (V), corriente (A) y potencia de entrada (W).

Cantidad de termopares utilizados: 9

Cantidad de sensores de temperatura LM35 utilizados: 9

No. de repeticiones de la prueba: 3

Pruebas 7, 8 y 9

5.5.3.4 Configuración 4

Medio de enfriamiento: contenedor de PCM colocado sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos

Tipo de convección: forzada, se utilizaron 3 ventiladores centrífugos

Parámetros monitoreados: temperatura (°C), voltaje (V), corriente (A) y potencia de entrada (W).

Cantidad de termopares utilizados: 12

Cantidad de sensores de temperatura LM35 utilizados: 16

No. de repeticiones de la prueba: 2

Pruebas 10 y 11

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados promedio de las pruebas experimentales realizadas con cada una de las configuraciones propuestas para el sistema de refrigeración del dispositivo. Los resultados incluyen las temperaturas mínimas que se registraron su interior, el tiempo que se requirió para llegar a ellas, el tiempo de autonomía de la red eléctrica conseguido con el uso del PCM, el consumo de energía registrado durante las pruebas del prototipo y la determinación de los ciclos de funcionamiento del sistema.

Los datos experimentales se representaron gráficamente a través de curvas que describen el proceso de enfriamiento y calentamiento²¹ de cada configuración. Posteriormente se obtuvieron las ecuaciones de ajuste de las curvas utilizando una regresión polinomial. Los ajustes presentaron un coeficiente de determinación en todos los casos del 99%, siendo el modelo ajustado una herramienta adecuada para la descripción de los procesos. Lo anterior se llevó a cabo con el empleo del software estadístico MicrocalTM OriginTM, versión 8.0.

Los resultados de las pruebas experimentales se pueden consultar por separado en los anexos que a continuación se indican:

- Configuración 1 – Pruebas 1, 2 y 3 – Anexo 28
- Configuración 2 – Pruebas 4, 5 y 6 – Anexo 29
- Configuración 3 – Pruebas 7, 8 y 9 – Anexo 30
- Configuración 4 – Pruebas 10 y 11 – Anexo 31

6.1 ENFRIAMIENTO

En la Figura 18 se observa que la disminución de la temperatura tiene un comportamiento no lineal, en este caso la variación de la temperatura muestra un comportamiento exponencial decreciente. Al principio la temperatura decrece rápidamente, pero a medida que se va acercando a la temperatura mínima, la temperatura decrece con mayor lentitud.

²¹ El proceso de calentamiento inicia cuando se detiene el funcionamiento del dispositivo de enfriamiento y la temperatura interior comienza a aumentar. La transferencia de calor se origina por la existencia de un gradiente de temperatura entre el ambiente del lugar de prueba y el interior del dispositivo.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

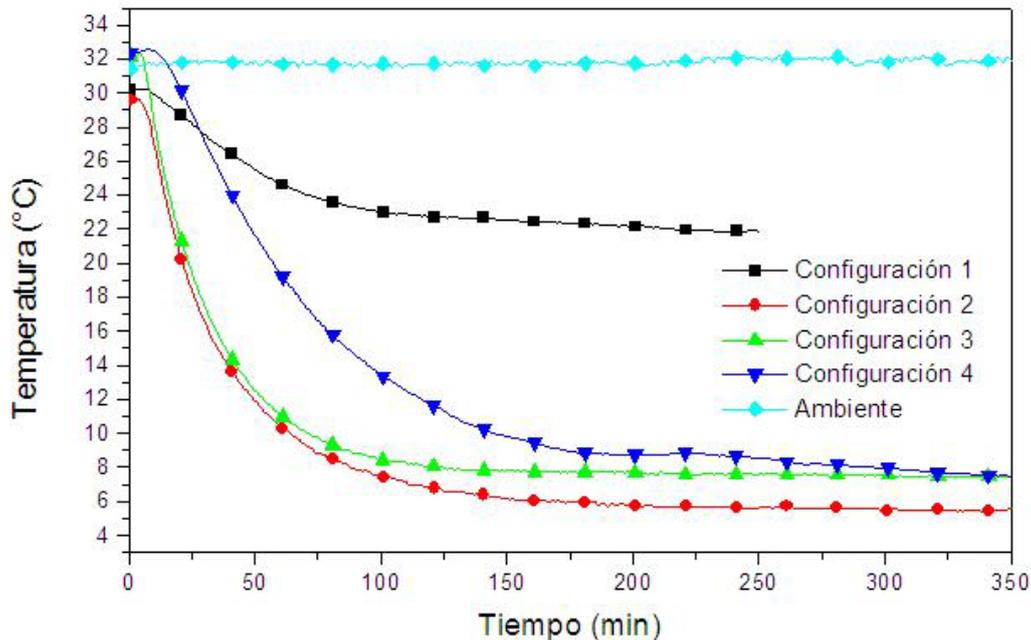


Figura 18. Curvas que describen el proceso de enfriamiento.

6.1.1 TEMPERATURAS MÍNIMAS

En la Tabla 19 se presentan las temperaturas mínimas en el interior del dispositivo de enfriamiento, el tiempo que se requirió para llegar a ellas y la temperatura promedio del ambiente del lugar de prueba. Además, se incluye una breve descripción de cada una de las configuraciones propuestas para el sistema de enfriamiento.

Tabla 19. Resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales del dispositivo durante el proceso de enfriamiento.

Configuración	Superficie de área convectiva mm ²	Temperatura mínima Tmín (°C)	Tiempo para llegar a la Tmín (min)	Tiempo total de prueba (min)	Temperatura ambiente promedio (°C)
1	21 600	21,87	238	238	31,76
Descripción	<i>Medio de enfriamiento:</i> placas frías de los ensambles termoeléctricos <i>Tipo de convección:</i> natural.				
2	150 000	6,2	226	230	29,56
Descripción	<i>Medio de enfriamiento:</i> placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> natural.				
3	150 000	6,70	226	300	31,95
Descripción	<i>Medio de enfriamiento:</i> placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> forzada.				
4	360 084	6,88	455	455	33,03
Descripción	<i>Medio de enfriamiento:</i> contenedor de PCM colocado sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> forzada.				

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo con la información contenida en la Tabla 19, la mínima temperatura que se registró en el interior del dispositivo de enfriamiento fue de 6.5 ± 0.3 °C. Esta temperatura se obtuvo en diferentes tiempos para las configuraciones 2, 3 y 4. La que requirió mayor tiempo para alcanzar esta temperatura fue la configuración 4, ya que el PCM se comportó como una resistencia térmica en la transferencia de calor por conducción entre las placas frías de los ensambles termoeléctricos, el contenedor de PCM y el PCM.

En el caso de la configuración 1, la temperatura mínima registrada fue de 21.87 °C, esto se debe a que el área de superficie convectiva de las placas frías de los ensambles termoeléctricos era equivalente a la séptima parte del área de superficie de la placa disipadora utilizada en las configuraciones 2 y 3.

En cuanto a la configuración 4, el área de superficie convectiva del contenedor de PCM fue aproximadamente diecisiete veces mayor a la de la configuración 1. Es por ello que la transferencia de calor por convección entre el aire y el área de superficie de la configuración 1 disminuyó considerablemente, teniendo como resultado una temperatura interior elevada.

Para las configuraciones 2 y 3, la temperatura mínima registrada fue de 6.2 y 6.7 °C respectivamente. Estas temperaturas se lograron después del mismo periodo de prueba. En estas pruebas se esperaba que para la configuración 3, la temperatura interior fuera menor a la de la configuración 2 y se consiguiera en menor tiempo, ya que en ella se emplearon ventiladores que favorecen la transferencia de calor por convección forzada.

Sin embargo, los resultados fueron contrarios a lo esperado, esto se debe a que la temperatura promedio del ambiente que se registró durante las pruebas de la configuración 3 fue 2.4 °C superior a la registrada durante las pruebas de la configuración 2; como resultado, la temperatura interior utilizando la configuración 3 tuvo un incremento de 0.5 °C.

Las curvas de enfriamiento se obtuvieron a partir de los datos experimentales de temperatura en función del tiempo, para ello se utilizó, como se mencionó con anterioridad, el software programa Microcal™ Origin™, versión 8.0. Para cada configuración se obtuvieron las ecuaciones que rigen el proceso de enfriamiento en el interior del dispositivo con un coeficiente de determinación de 0,99 (Tabla 20).

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tabla 20 . Ecuaciones que rigen el proceso de enfriamiento.

Configuración	Ecuación	Grado
1	$A=30,29233, B=0,01948, C=-0,00779, D=2,04E-04, E=-2,83E-06, F=2,47E-08, G=-1,39E-10, H=4,82E-13, I=-9,43E-16, J=7,91E-19$	9
2	$A=32,81227, B=-0,78162, C=0,0105, D=-8,03E-05, E=3,64E-07, F=-9,60E-10, G=1,35E-12, H=-7,83E-16$	7
3	$A=35,4045, B=-0,88212, C=0,0123, D=-9,51E-05, E=4,33E-07, F=-1,15E-09, G=1,65E-12, H=-9,88E-16$	7
4	$A=34,47845, B=-0,23212, C=-0,00129, D=2,47E-05, E=-1,21E-07, F=2,55E-10, G=-1,99E-13$	6

6.1.2 SUPERENFRIAMIENTO

En la Figura 19 se muestra el comportamiento de una de las pruebas realizadas para la configuración 4 durante la fase de enfriamiento. Esta configuración consiste en el empleo de PCM como parte del sistema de refrigeración del dispositivo. Para esta configuración se realizaron dos pruebas (No. 10 y 11), cuyos resultados se pueden consultar con mayor detalle en el Anexo.

La gráfica que a continuación se presenta, es resultado de las mediciones pertenecientes a la prueba No. 11 y se obtuvieron resultados similares para la prueba No.10 (consultar Anexo).

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

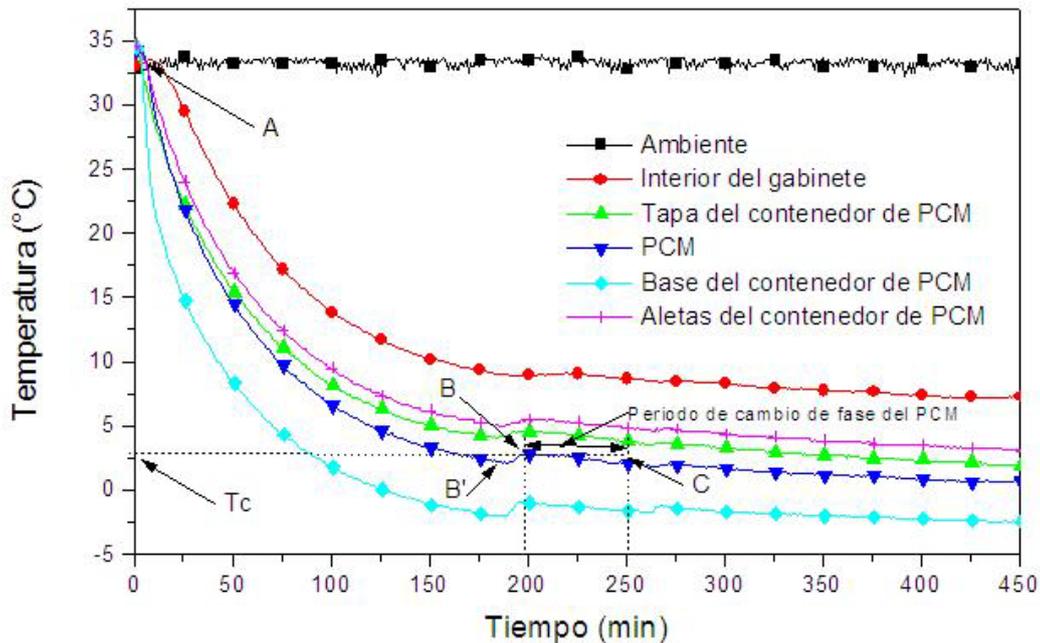


Figura 19. Comportamiento del PCM durante el proceso de enfriamiento.

Como se puede observar, durante la etapa de enfriamiento, la temperatura del PCM, el contenedor de PCM y la temperatura interior del dispositivo disminuyeron rápidamente en los primeros 200 minutos y una vez que ocurrió el cambio de fase del PCM (B-C), la temperatura disminuyó lentamente y de manera constante.

En la Figura 19 se observa que la temperatura disminuye del punto A al punto B', a este fenómeno se le conoce como superenfriamiento²² (Kenneth 2004). En seguida, se produce un aumento de la temperatura desde el punto B' al B, durante esta etapa comienza la cristalización del PCM.

Una vez que se empiezan a formar los cristales, la liberación del calor latente de congelación o solidificación²³ provoca el aumento de la temperatura hasta llegar a la temperatura de congelación (T_c) del PCM. Posteriormente, el proceso de cambio de fase ocurre del punto B al punto C en el cual la temperatura se mantiene constante.

²² El superenfriamiento también es conocido como congelación parcial o refrigeración profunda, el cual consiste en reducir la temperatura de un líquido por debajo de su punto de congelación sin llegar a la formación de cristales, es decir el líquido no se solidifica (Bello 2000).

²³ Durante la congelación se libera calor a medida que el líquido cambia de estado líquido, con un alto nivel de energía, a estado sólido, con un bajo nivel de energía; a esta diferencia de energía se le conoce como calor latente de solidificación.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1.3 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

En la siguiente gráfica (Figura 20) se muestra una comparación entre los resultados que se obtuvieron a partir de las pruebas pertenecientes a las configuraciones 2 y 3. En ambas configuraciones se utilizó una placa disipadora de calor como medio de enfriamiento, la diferencia entre ellas radicó en el tipo de convección que se empleó. Para la configuración 2 se utilizó convección natural y para la configuración 3 se recurrió a la convección forzada.

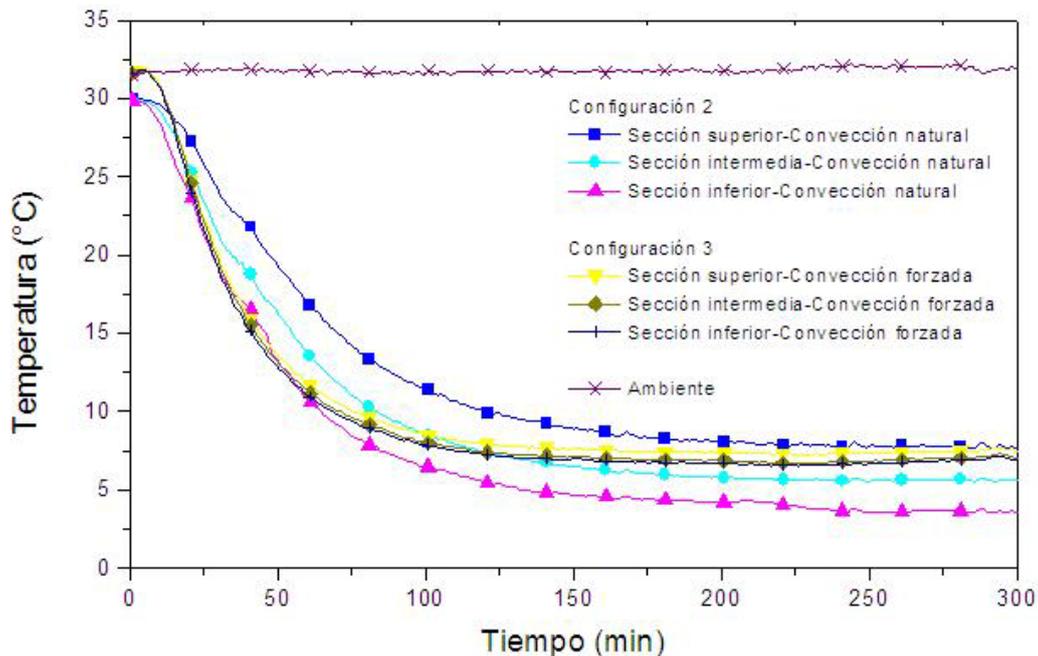


Figura 20. Curvas de enfriamiento que representan las temperaturas en la sección superior, intermedia e inferior del dispositivo.

Se observa que para la configuración 2 existe una marcada diferencia entre las curvas que representan las temperaturas de las secciones superior, intermedia e inferior del interior del dispositivo de enfriamiento. La temperatura de la sección superior es la de mayor valor y la menor temperatura se encuentra en la sección inferior del dispositivo; esto se debe al movimiento natural de ascensión del aire caliente originado por la diferencia de densidades entre el aire frío y el caliente. La densidad del aire disminuye al calentarse y tiende a ascender sobre el medio más denso, es decir el aire frío. Este fenómeno se conoce como convección natural (Kreith y Bohn 2001).

En contraparte, se observa una diferencia mínima de temperaturas en las curvas pertenecientes a la configuración 3, es decir, la distribución de la temperatura en el interior del dispositivo de enfriamiento en sus tres secciones: superior, intermedia e inferior, fue uniforme. Lo anterior fue consecuencia de la convección forzada del aire que se generó por el uso de los ventiladores, los cuales homogeneizaron la temperatura en el interior del dispositivo.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.2 CALENTAMIENTO

6.2.1 TIEMPO PARA LLEGAR A LA TEMPERATURA AMBIENTE

Los resultados de las pruebas durante el calentamiento en el interior del dispositivo se muestran gráficamente en la Figura 21. Se observa que el aumento de la temperatura tiene un comportamiento exponencial creciente. Una vez que el funcionamiento del dispositivo se detiene, la temperatura en el interior comienza a aumentar rápidamente.

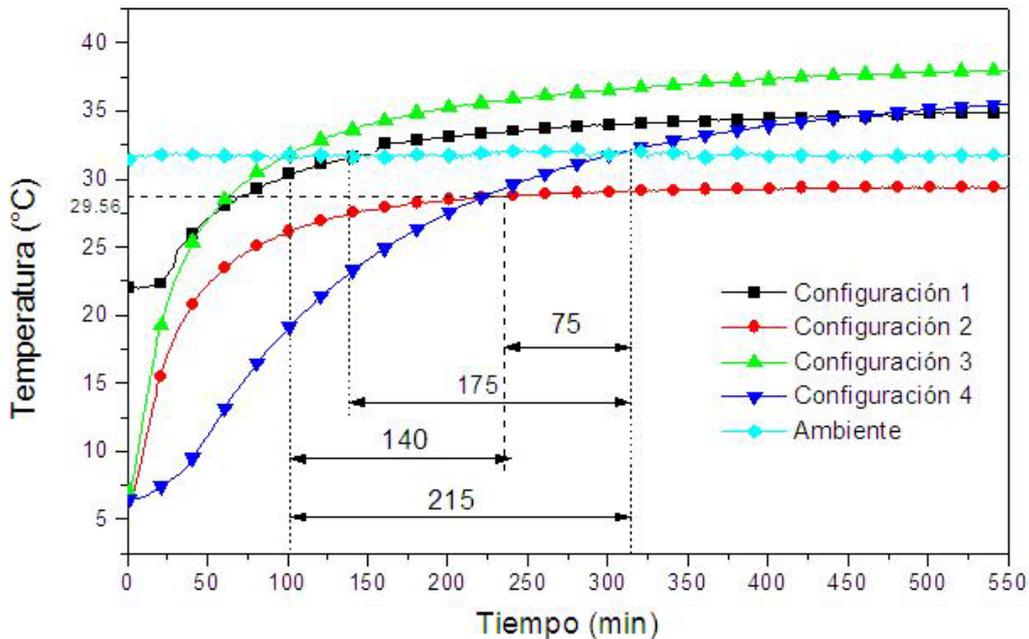


Figura 21. Curvas que representan el proceso de calentamiento

Además, se observa que incluso la temperatura interior del dispositivo sobrepasa la temperatura ambiente. Esto ocurre, debido a que los ensambles termoeléctricos sirven como un puente térmico que permite la transferencia de calor a través de ellos desde el ambiente hacia el interior del dispositivo con mayor facilidad, ya que están construidos con materiales conductores.

En el caso de la curva que representa a la configuración 2, se observa que no interseca a la de la temperatura ambiente. Lo anterior sucede porque durante las pruebas hechas para esta configuración, la temperatura promedio fue de 29,56 °C. En la Figura 21 se presenta el promedio de las mediciones de la temperatura ambiente (31,56 °C) realizadas para las cuatro configuraciones, es por ello que en esta gráfica no se observa dicha intersección. Sin embargo, como se muestra en la Figura 21, la intersección ocurre aproximadamente en el minuto 240.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La curva que representa la configuración 4 y que hace uso del PCM (Figura 21), tardó hasta 215 minutos más que la configuración 3 para llegar a la temperatura ambiente promedio. En cuanto a las configuraciones 2 y 1, la configuración 4 aumentó el tiempo para igualar la temperatura ambiente en 75 y 175 minutos respectivamente.

Como se observa, el uso del PCM retrasa hasta un máximo de 3,5 horas el incremento de la temperatura interior del dispositivo de enfriamiento, una vez que se interrumpe su funcionamiento. En el caso de las configuraciones 2 y 3, en donde la principal diferencia fue el tipo de convección empleada: natural y forzada respectivamente, se observa que la configuración 2 tardó 140 minutos más que la configuración 3 en llegar a la temperatura ambiente. Esto se debe a que en la configuración 2 no se utilizaron ventiladores que forzaran la circulación del aire, ello originó que el aumento de la temperatura se llevara a cabo con mayor lentitud.

En la Tabla 21 se muestra el tiempo que requirió cada configuración para llegar a la temperatura ambiente, después de que se logró la temperatura mínima en el interior del dispositivo.

Tabla 21. Tiempo para igualar la temperatura ambiente a partir de la temperatura mínima.

Configuración	Descripción	Temperatura mínima (°C)	Tiempo para llegar a la temp. ambiente (min)
1	<i>Medio de enfriamiento:</i> placas frías de los ensambles termoeléctricos <i>Tipo de convección:</i> natural	21.87	140
2	<i>Medio de enfriamiento:</i> placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> natural	6.2	240
3	<i>Medio de enfriamiento:</i> placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> forzada	6.7	100
4	<i>Medio de enfriamiento:</i> contenedor de PCM colocado sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> forzada	6.88	315

Las curvas de calentamiento se obtuvieron a partir de los datos experimentales de temperatura en función del tiempo, para ello se utilizó el software programa Microcal™ Origin™, versión 8.0. Para cada configuración se obtuvieron las ecuaciones que rigen el proceso de calentamiento en el interior del dispositivo con un coeficiente de determinación de 0,99 (Tabla 22).

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tabla 22. Ecuaciones que rigen el proceso de calentamiento.

Configuración	Ecuación	Grado
1	$A=20,36772$, $B=0,16755$, $C=-9,43E-04$, $D=3,10E-06$, $E=-6,30E-09$, $F=8,04E-12$, $G=-6,30E-15$, $H=2,77E-18$, $I=-5,20E-22$	8
2	$A=5,54374$, $B=0,56586$, $C=-0,00639$, $D=4,04E-05$, $E=-1,53E-07$, $F=3,60E-10$, $G=-5,27E-13$, $H=4,68E-16$, $I=-2,31E-19$, $J=4,84E-23$	9
3	$A=7,81627$, $B=0,78239$, $C=-0,01171$, $D=1,03E-04$, $E=-5,46E-07$, $F=1,80E-09$, $G=-3,70E-12$, $H=4,61E-15$, $I=-3,19E-18$, $J=9,35E-22$	9
4	$A=8,74857$, $B=0,19498$, $C=-6,58E-04$, $D=1,22E-06$, $E=-1,16E-09$, $F=4,35E-13$	5

6.3 CONSUMO DE ENERGÍA

El consumo de energía promedio registrado para cada una de las configuraciones propuestas, se muestra en la Figura 22. Se observa que el menor consumo energético corresponde con el de la configuración 1 con un consumo promedio de 0,36 kW/hr.

Por otro lado, el mayor consumo de energía corresponde al de la configuración 4, el cual registró un consumo de energía promedio de 0,4 kW/hr. Las configuraciones 2 y 3 presentan un consumo de energía similar de aproximadamente 0,38 kW/hr, ya que la única diferencia entre ellas radicó en el uso de tres ventiladores de 3,3 W cada uno.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

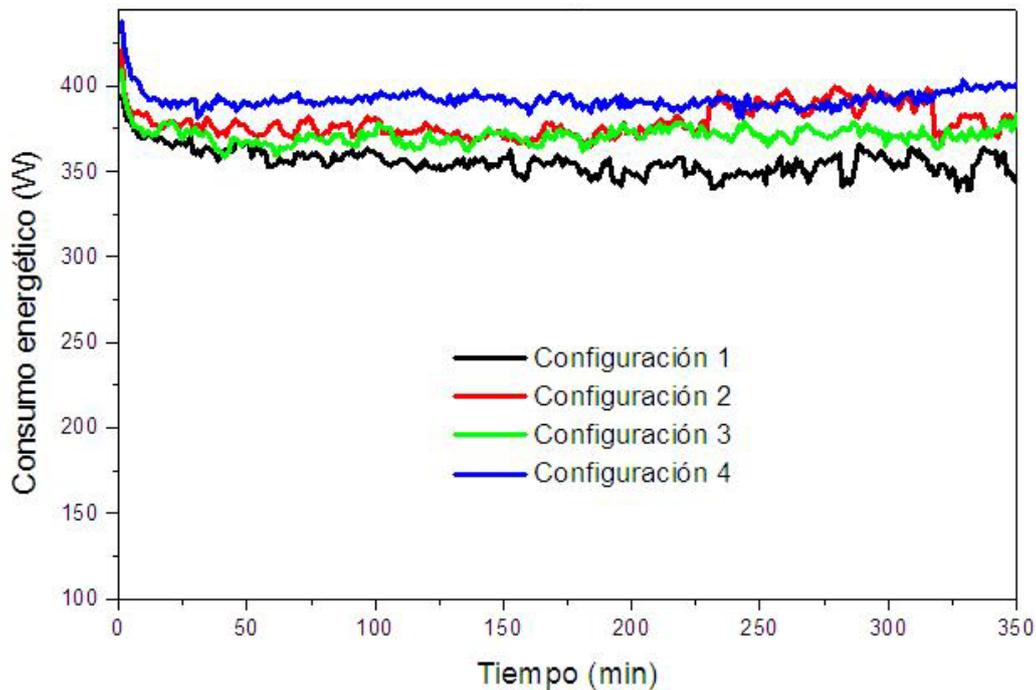


Figura 22. Consumo de energía del prototipo de prueba.

En la Tabla 23 se muestran los resultados de voltaje y corriente promedio de operación del dispositivo para cada una de las configuraciones propuestas. Además se incluyen los datos correspondientes a la demanda de energía que se presentó durante el arranque del sistema. De acuerdo con los resultados de la Tabla 23, la configuración con la que se registró el mayor consumo de energía corresponde a la configuración 4. La causa del incremento del consumo energético radica en la adición de una carga térmica al sistema de refrigeración, en este caso la carga térmica añadida fue el PCM.

Tabla 23. Consumo energético del dispositivo de enfriamiento para las diferentes configuraciones.

Configuración	Consumo de energía promedio (kWh ²⁴)	Consumo de energía promedio en el arranque (kW ²⁵)	Voltaje promedio (V)	Corriente promedio (A)
1	0,35	0,38	114,99	3,81
2	0,38	0,42	114,39	4,09
3	0,39	0,40	112,97	4,10
4	0,40	0,44	120,72	4,21

²⁴ La energía se expresa en watt-hora (Wh) o kilowatt-hora (kWh), siendo importante especificar en qué periodo de tiempo se consumió o produjo la energía, es decir, si es diaria, mensual o anual. La energía es la capacidad que se necesita para ejecutar acciones externas, es decir, la materia prima que se requiere para realizar trabajo.

²⁵ La potencia se expresa en watt (W) o kilowatt (kW). El trabajo realizado en un determinado tiempo se define como potencia.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.4 CICLOS DE FUNCIONAMIENTO

Los ciclos de funcionamiento del dispositivo están constituidos por tres periodos de tiempo:

- 1) Tiempo de arranque
- 2) Tiempo de autonomía de la red eléctrica
- 3) Tiempo de funcionamiento

A continuación se describe en qué consiste cada periodo de tiempo.

6.4.1 TIEMPO DE ARRANQUE

El tiempo de arranque corresponde con el periodo de tiempo en donde se registraron los mayores decrementos de temperatura. En la Figura 23 se muestran las curvas que representan la velocidad de enfriamiento promedio que se registró durante cada evento de prueba correspondiente a cada configuración propuesta para el sistema de enfriamiento del dispositivo. Lo anterior significa que un punto perteneciente a una curva, representa los grados que disminuyó la temperatura en el interior del dispositivo después de un minuto de funcionamiento.

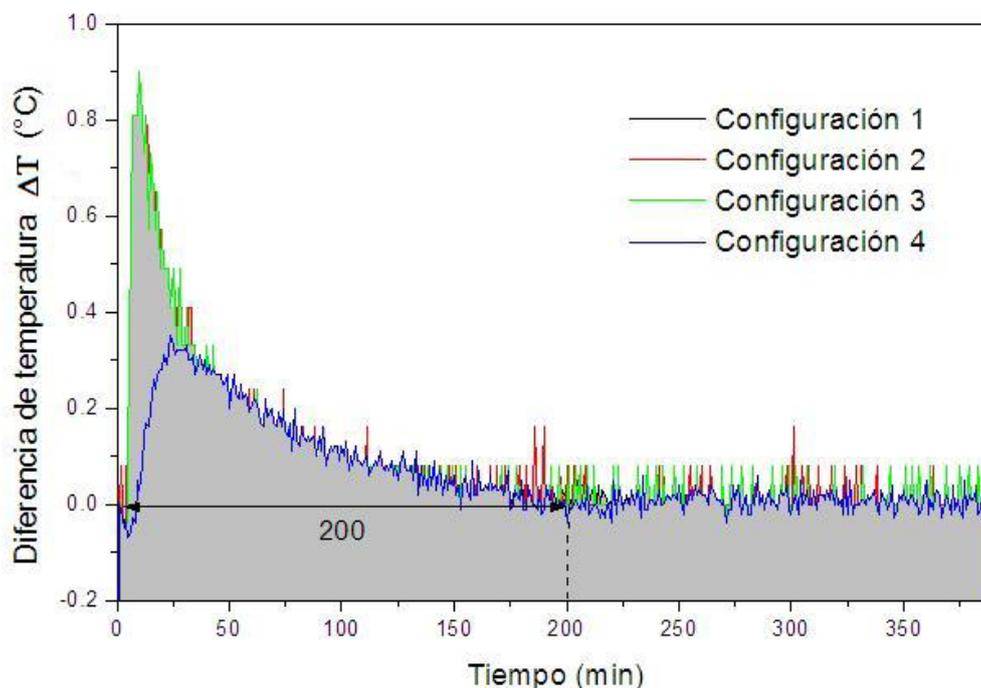


Figura 23. Tiempo que presenta el mayor decremento de la temperatura interior del dispositivo durante el proceso de enfriamiento.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo con la Figura 23, las mayores diferencias de temperatura se producen aproximadamente en los primeros 200 minutos de prueba; en consecuencia la temperatura decrece con mayor rapidez durante este periodo de tiempo. Posteriormente, los diferenciales de temperatura disminuyen transcurridos los 200 minutos de prueba, originando que el decremento de la temperatura se vuelva más lento y constante.

Por lo tanto, con base en la información mostrada en la Figura 23, el arranque del dispositivo debe ser de aproximadamente 200 minutos para las configuraciones 2, 3 y 4. Este periodo de funcionamiento es en donde se registra la mayor rapidez de decremento de temperatura en el interior del dispositivo.

Al determinar el periodo de funcionamiento para el arranque, se logra que disminuya el consumo energético del dispositivo, ya que transcurrido ese lapso, se detiene su operación. Si el dispositivo continuara operando después de este periodo, entonces seguiría consumiendo una gran cantidad de energía que sería útil únicamente para disminuir de 1 a 2 °C la temperatura interior; cuando en los primeros 200 minutos de prueba, el diferencial de temperatura registrado fue equivalente a 23, 24 y 26 °C para las configuraciones 2, 3 y 4 respectivamente.

Una vez que se determinó el tiempo de arranque, se establecieron las temperaturas mínimas de operación del dispositivo de enfriamiento, con ello se evita que el dispositivo consuma una gran cantidad de energía para llegar una temperatura mínima que en términos de eficiencia y costo no es viable.

En la Tabla 24 se indican las temperaturas mínimas de operación que se obtuvieron después de 200 minutos de funcionamiento. Las temperaturas se calcularon a partir de las ecuaciones que describen el proceso de enfriamiento (Tabla 20).

Tabla 24. Temperaturas mínimas de operación.

Configuración	Descripción	Temperatura mínima de operación (°C)
1	<i>Medio de enfriamiento:</i> placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> natural	21,99 ≈ 22
2	<i>Medio de enfriamiento:</i> placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> natural	5,8 ≈ 6
3	<i>Medio de enfriamiento:</i> placa disipadora de calor colocada sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> forzada	7,49 ≈ 8
4	<i>Medio de enfriamiento:</i> contenedor de PCM colocado sobre las placas frías de los ensambles termoeléctricos. <i>Tipo de convección:</i> forzada	8,89 ≈ 9

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 24 se muestran las curvas de enfriamiento, en ella se señalan las temperaturas mínimas promedio que se obtuvieron después de 200 minutos de funcionamiento (Tabla 21).

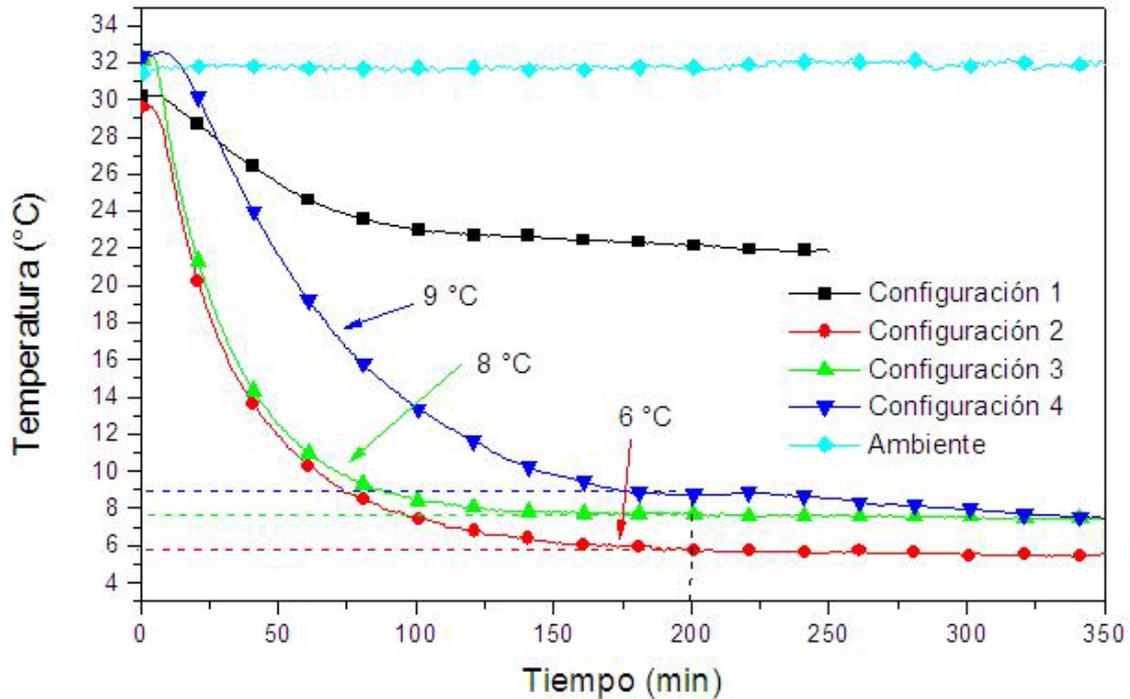


Figura 24. Temperatura mínima en el interior del dispositivo después de 200 minutos de funcionamiento.

6.4.2 TIEMPO DE AUTONOMÍA

El tiempo de autonomía corresponde con el tiempo de mantenimiento de la temperatura interior del dispositivo de enfriamiento. El tiempo de mantenimiento se definió a partir del establecimiento de tres rangos de variación de temperatura para la operación del sistema: 5, 10 y 15 °C. Una vez definidos los rangos de variación de temperatura y las temperaturas mínimas de operación, fue posible definir las temperaturas máximas de operación del dispositivo de enfriamiento.

Con base en las ecuaciones que describen el calentamiento en el interior del dispositivo (Tabla 22), se calculó el tiempo de mantenimiento de la temperatura interior que se logró con las configuraciones 2, 3 y 4. Los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla 25.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tabla 25. Tiempo de mantenimiento de la temperatura interior del dispositivo de enfriamiento.

Configuración	Temperatura mínima de operación (°C)	Rango de variación de temperatura ΔT (°C)	Temperatura máxima de operación (°C)	Tiempo de autonomía (mantenimiento) (min)
2	6	5	11	11
		10	16	24
		15	21	44
3	8	5	13	7,5
		10	18	16,5
		15	23	29
4	9	5	14	30
		10	19	65
		15	24	114

En la Tabla 25 no se incluyen los cálculos para la configuración 1 ya que la temperatura mínima registrada después de 200 minutos de prueba fue de 21,87°C. Esta temperatura se encuentra en rangos superiores a los alcanzados con las demás configuraciones, y no es útil para aplicaciones de refrigeración.

De acuerdo con los resultados, en la Figura 25 se observa que la variación de la temperatura en el interior del dispositivo utilizando la configuración que hace uso del PCM, presenta un tiempo de mantenimiento 4 veces mayor que el registrado con la configuración 3. Lo anterior ocurre para los tres rangos de variación de la temperatura de operación: 5, 10 y 15 °C.

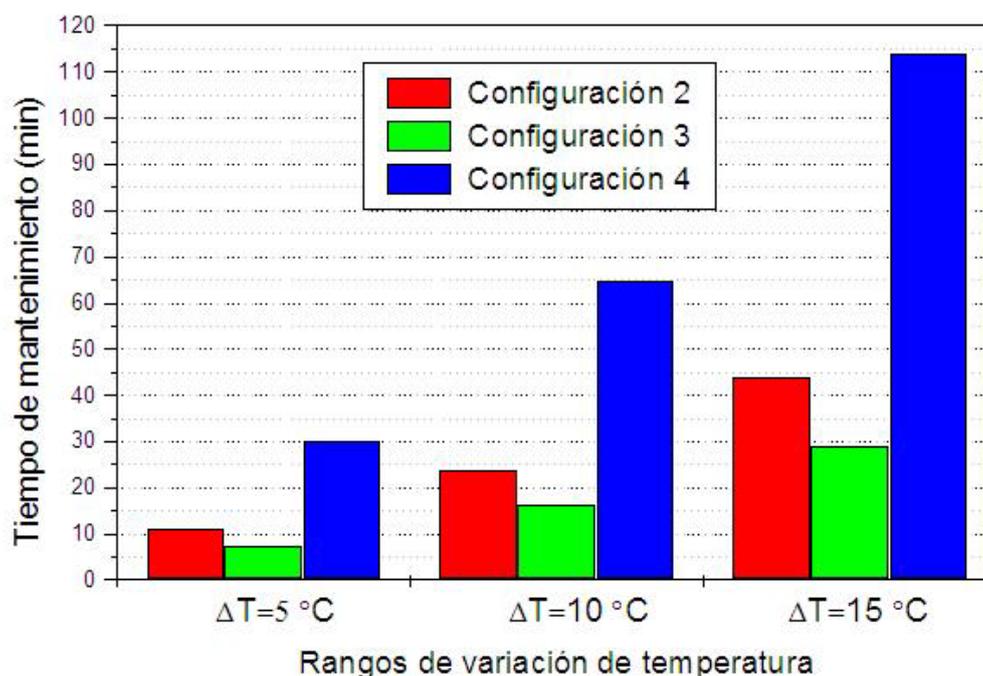


Figura 25. Tiempos de mantenimiento de la temperatura interior del dispositivo de enfriamiento para las configuraciones 2, 3 y 4.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Por otra parte, el uso del PCM aumenta el tiempo de mantenimiento de la temperatura interior desde 2,5 hasta 2,7 veces, si se compara con el conseguido utilizando la configuración 2. Recordando que las configuraciones 2 y 3 utilizan una placa disipadora de calor como medio de enfriamiento y la única diferencia entre ellas radica en el tipo de convección que se utilizó: natural y forzada respectivamente

6.4.3 TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO

El tiempo de funcionamiento es el tiempo de enfriamiento que se requiere para pasar de la temperatura máxima a la temperatura mínima de operación del dispositivo de enfriamiento (Tabla 26).

Tabla 26. Tiempo de funcionamiento del dispositivo de enfriamiento.

Configuración	Temperatura mínima después de 200 minutos de funcionamiento (°C)	Rango de variación de temperatura ΔT (°C)	Temperatura máxima (°C)	Tiempo de funcionamiento (enfriamiento) (min)
2	6	5	11	114
		10	16	137
		15	21	150
3	8	5	13	76
		10	18	94
		15	23	106
4	9	5	14	91
		10	19	122
		15	24	144

La temperatura mínima es la que se registró después de 200 minutos de funcionamiento del dispositivo y la temperatura máxima es la que se definió a partir de los rangos de variación de temperatura de 5, 10 y 15 °C. El tiempo de funcionamiento se calculó con las ecuaciones que describen el proceso de enfriamiento (Tabla 20).

De acuerdo con los resultados, en la Figura 26 se observa que el menor tiempo de funcionamiento se consigue con la configuración 3, es decir requiere de menor tiempo para llegar a la temperatura mínima de operación a partir de la temperatura máxima.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Por otra parte, el uso del PCM (configuración 4), requiere que el dispositivo de enfriamiento funcione desde 15 hasta 38 minutos más, si se compara con la configuración 3; ésto se debe a que como se mencionó con anterioridad, el PCM se comporta como una resistencia térmica en la transferencia de calor por conducción entre las placas frías del ensamble termoeléctrico, el contenedor de PCM y el PCM, provocando que la velocidad de decremento de la temperatura interior sea más lenta. Además, se observa que los menores tiempos de funcionamiento se obtienen para un rango de variación de temperaturas de 5 °C para todas las configuraciones.

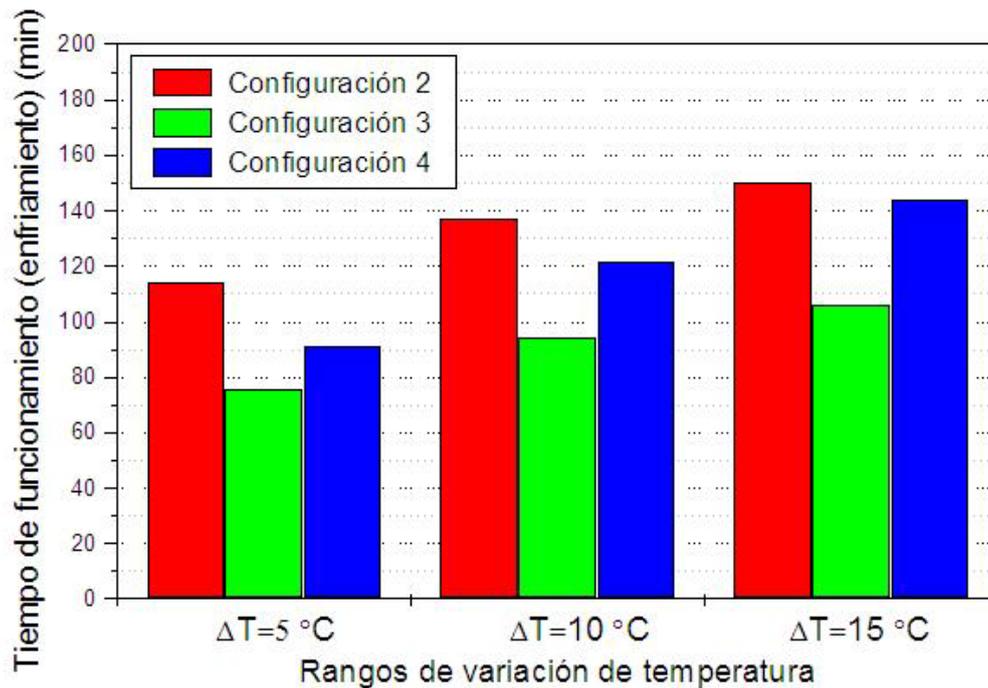


Figura 26. Tiempos de funcionamiento del dispositivo de enfriamiento para las configuraciones 2, 3 y 4.

En la Figura 27 se muestra una comparación entre los periodos de autonomía y funcionamiento de las configuraciones 2, 3 y 4 para los diferentes rangos de variación de temperatura.

Se observa que para todos los casos, los tiempos de autonomía son menores a los tiempos de funcionamiento. Los mayores tiempos de autonomía de la red eléctrica se consiguen con la configuración 4 que hace uso del PCM. En particular, para una variación de temperatura de operación de 15°C, se consigue el mayor tiempo de autonomía de la red eléctrica convencional.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

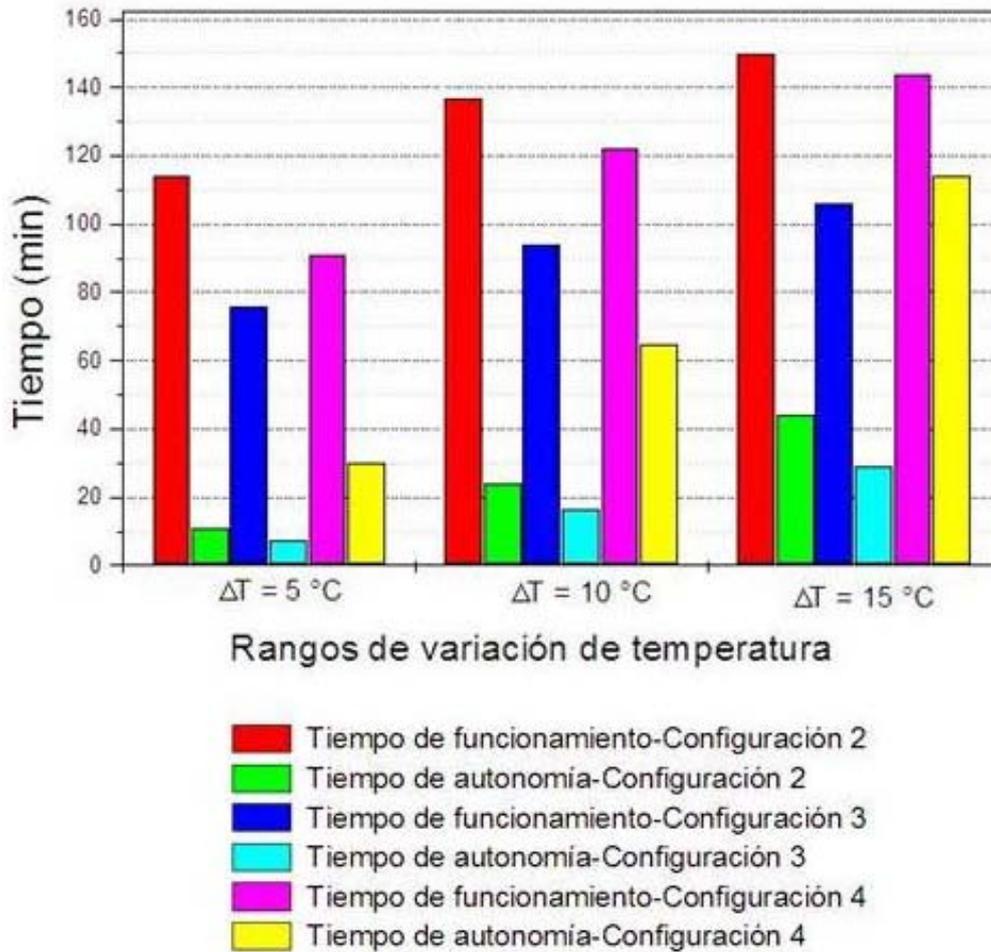


Figura 27. Comparación entre tiempos de funcionamiento y autonomía del dispositivo de enfriamiento para las configuraciones 2, 3 y 4.

Dado que los mayores tiempos de autonomía de la red eléctrica corresponden a la configuración 4, únicamente se determinaron los ciclos de funcionamiento del dispositivo de enfriamiento para esta configuración para los diferentes rangos de variación de temperatura. Como se observa en la Figura 27, los tiempos de autonomía de las configuraciones 2 y 3 son mínimos, por lo que no se tomaron en cuenta para su evaluación. Los ciclos de funcionamiento están compuestos por los tiempos de arranque, de autonomía y de funcionamiento. La operación del dispositivo de enfriamiento es muy simple y se basa en el principio de operación de un dispositivo de enfriamiento convencional que utiliza un controlador de temperatura de encendido/apagado (On/Off).

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El ciclo de funcionamiento inicia con el periodo de arranque, el cual consiste en llegar a la temperatura mínima de operación a partir de la temperatura ambiente. Posteriormente, una vez que se alcanza temperatura mínima, el dispositivo detendrá su funcionamiento hasta que registre la temperatura máxima de operación; este periodo de tiempo es el tiempo de autonomía del dispositivo. Finalmente, una vez que se llega a la temperatura máxima, el dispositivo comienza nuevamente su operación hasta lograr la temperatura mínima, lo anterior es equivalente al tiempo de funcionamiento. En la Tabla 27 se indican las horas correspondientes a cada periodo de tiempo que conforma al ciclo de funcionamiento del dispositivo.

Tabla 27. Ciclos de funcionamiento del dispositivo de enfriamiento..

CONFIGURACIÓN 4			
Rango de variación de temperatura ΔT (°C)	5	10	15
Rango temperatura de operación (°C)	9-14	9-19	9-24
Tiempo de Arranque (h)	3	3	3
Tiempo de Autonomía (h)	5	8	9,5
Tiempo de Funcionamiento (h)	16	13	11,5
Total (h)	24	24	24

Como se observa, mientras mayor sea el rango de variación de temperatura de operación del dispositivo de enfriamiento, mayor es el tiempo de autonomía de la red eléctrica que se le puede brindar al sistema, es decir el tiempo de autonomía es directamente proporcional al rango de variación de temperatura del dispositivo. En la Figura 28 se muestra una comparación de los tiempos de arranque, autonomía y funcionamiento correspondientes a la configuración 4 para los rangos de variación de temperatura establecidos con anterioridad.

En la Figura 29 se muestra una gráfica en donde se compara el consumo de energía anual del dispositivo, cuyo sistema de enfriamiento incluye el uso del PCM, con los tres rangos de variación de temperatura (5, 10 y 15 °C).

Para el cálculo del consumo energético del dispositivo de enfriamiento se tomaron como referencia valores nominales de operación del sistema y los tiempos que conforman un ciclo de funcionamiento: arranque, autonomía y funcionamiento. El tiempo de arranque se consideró solamente para el primer día de operación del dispositivo, para el resto de los días se tomó en cuenta únicamente el tiempo de funcionamiento y autonomía del sistema.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

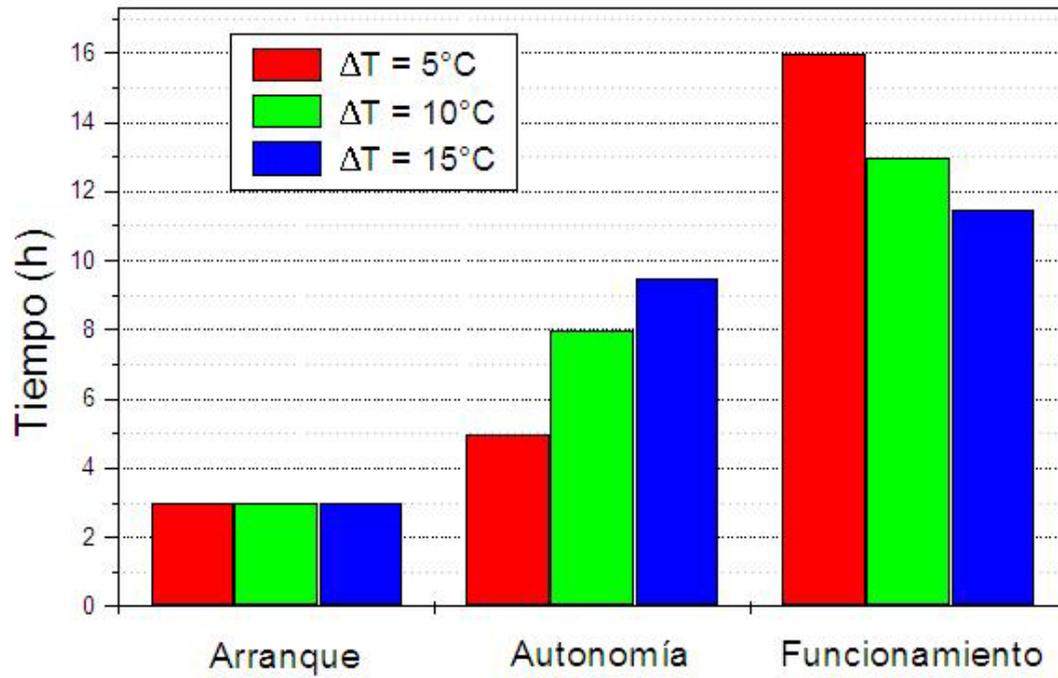


Figura 28. Ciclos de funcionamiento de la configuración 4.

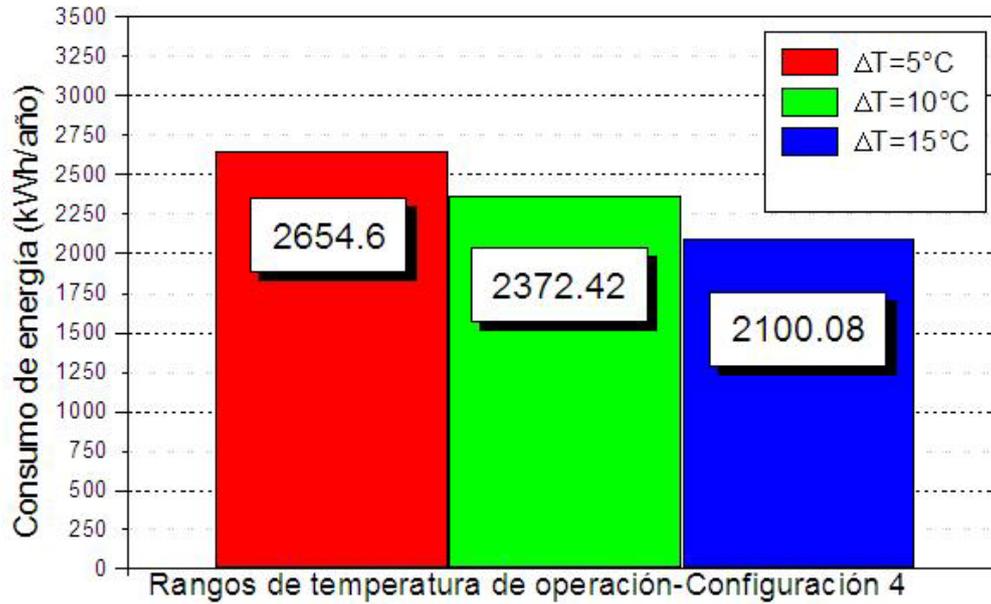


Figura 29. Consumo de energía del dispositivo de enfriamiento para diferentes rangos de variación de temperatura-Configuración 4.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como se puede observar, el consumo de energía es inversamente proporcional al rango de variación de temperatura permitida en el interior del dispositivo, es decir, mientras menor sea el rango de variación de temperatura, entonces el consumo energético aumentará. Por el contrario, mientras mayor sea el rango de variación de la temperatura, entonces el consumo de energía decrecerá.

6.5 SISTEMA FOTOVOLTAICO SELECCIONADO

El dimensionamiento del sistema fotovoltaico se realizó con el único objetivo de demostrar que el dispositivo es capaz de funcionar con una fuente de energía renovable como la solar y que se puede obtener cierto periodo de autonomía de la red eléctrica convencional.

No es propósito de este trabajo de investigación dimensionar el sistema fotovoltaico para igualar o minimizar el consumo energético promedio de dispositivos de enfriamiento domésticos convencionales. Si esto fuera así, sería un imperativo el aumento del número de componentes del sistema. Esto significa mayor número de paneles fotovoltaicos y baterías que proporcionen y almacenen la energía eléctrica suficiente para el funcionamiento del prototipo.

Con base en lo anterior, se seleccionó el menor número de componentes para el sistema fotovoltaico (Anexo 25). Para el almacenamiento de energía eléctrica se requirieron dos baterías con capacidad de 115 Ah con las que se puede obtener un periodo de autonomía de hasta seis horas en un día de operación²⁶. De esta forma, el dispositivo de enfriamiento podría funcionar durante este tiempo con la energía eléctrica almacenada en las baterías.

²⁶ Con el objetivo de facilitar los cálculos para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, se consideró el caso hipotético de cinco horas pico de irradiación solar constante de $1\,000\text{ W/m}^2$ de 9 a 14 hrs, durante un periodo de tiempo relativamente corto. Debe aclararse que estas horas pico no significan que existan solamente cinco horas de irradiación solar en un día. Las cinco horas de $1\,000\text{ W/m}^2$ se consideran en condiciones ideales, y equivalen a lo que se lograría obtener de irradiación solar en un día normal.

7. CONCLUSIONES

- **Tecnología termoeléctrica como parte del sistema de refrigeración de un dispositivo de enfriamiento de uso doméstico.**

La selección de la configuración para el sistema de refrigeración del dispositivo tomó como punto de referencia el consumo energético. La configuración con la que se obtuvo el menor consumo de energía corresponde a la configuración 4, que hace uso del PCM. No obstante, esta configuración presenta inconvenientes en cuanto a la aplicación a la que se destinó en un inicio: aplicación de uso doméstico.

Un dispositivo de enfriamiento de uso doméstico tiene que cumplir normas establecidas por la Secretaría de Energía (SENER), las cuales se relacionan con aspectos referentes a límites de consumo de energía máximos, eficiencia energética y cumplimiento de temperaturas normalizadas. La Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2002 establece que para un refrigerador con las características (capacidad volumétrica) que el prototipo presenta, debe cumplir con los siguientes límites de energía (E_{MAX}) y temperatura (T):

$$E_{MAX} = 248.4 \text{ kWh/año}$$

$$T = 4 \pm 3^{\circ}\text{C}, \text{ en el espacio donde se mantienen los alimentos.}$$

De acuerdo con los resultados obtenidos, utilizando la configuración 4, el prototipo presenta un consumo energético y temperaturas superiores a las establecidas por la norma, obteniendo los siguientes valores:

- Consumo mínimo de energía
 $E_{MAX} = 2100.08 \text{ kWh/año}$ para un rango de variación de temperatura de $9 \pm 15^{\circ}\text{C}$.
- Rango mínimo de variación de temperatura
 $T = 9 \pm 5^{\circ}\text{C}$ correspondiente con un consumo de energía de 2654.6 kWh/año .

Con base en lo anterior, la refrigeración por métodos termoeléctricos en aplicaciones de uso doméstico exige un elevado consumo de energía eléctrica; esto se debe principalmente por la baja eficiencia de los dispositivos termoeléctricos, la carga térmica que se requiere remover y por las condiciones de uso del dispositivo. Es por ello que la refrigeración termoeléctrica no se considera viable en esta área de aplicación, ya que en términos económicos, de consumo energético y eficiencia no es una tecnología capaz de competir con el ciclo termodinámico por compresión de vapor.

Sin embargo, se pueden encontrar aplicaciones en donde sean admisibles rangos con mayor amplitud de variación de temperatura y en donde la carga térmica a remover sea inferior a la que se presenta en dispositivos de uso doméstico. Es por ello, que una de las aplicaciones que se consideran viables para la implementación de dispositivos termoeléctricos, se encuentra en dispositivos de enfriamiento compactos que a su vez sean portables.

Al tener un menor espacio a refrigerar, la carga térmica disminuye, por lo que se requiere una menor cantidad de dispositivos termoeléctricos para el enfriamiento. En consecuencia, el consumo de energía se reduce. Por otra parte, al requerir un menor número de dispositivos termoeléctricos, el traslado del dispositivo se facilita porque su peso disminuye.

Es también importante resaltar las ventajas que se presentan con este principio de funcionamiento: se puede producir calor o frío invirtiendo la polaridad del voltaje aplicado, el nivel de ruido y vibraciones comparadas con las de un sistema de compresión de vapor son menores, se puede variar la capacidad de enfriamiento si se actúa sobre la tensión de alimentación, el sistema no posee elementos móviles y puede funcionar en cualquier posición.

- **Conveniencia del uso del PCM como parte del sistema de refrigeración del dispositivo de enfriamiento**

El uso del PCM tiene un efecto positivo en el mantenimiento de la temperatura interior del dispositivo de enfriamiento y por lo tanto en su consumo energético. Sin embargo, su beneficio no es tan significativo cuando se manejan rangos de temperatura que requieren alto grado de precisión y exactitud, comparados con los beneficios que se pueden obtener cuando el sistema de refrigeración maneja rangos de variación de temperatura amplios.

Por otra parte, uno de los principales problemas que afronta la industria solar radica en los medios y la forma en la que se almacena actualmente la energía eléctrica producida por paneles fotovoltaicos. Aunque las baterías son el medio más conveniente de almacenamiento de energía eléctrica en la actualidad, los materiales para su construcción son nocivos para el medio ambiente. Además, su uso es más recomendable para aplicaciones en las que se requieren bajos niveles de potencia; de otra forma se necesitaría una gran cantidad de ellas para almacenar la energía requerida por un sistema con elevada demanda energética.

En sistemas de refrigeración híbridos, el uso del PCM funciona como una alternativa para resolver la dificultad planteada en el párrafo precedente, ya que se utilizan sustancias no tóxicas para almacenar energía térmica y la temperatura interior del dispositivo se conserva por más tiempo dentro de los rangos de temperatura de operación, por consiguiente se requiere de menor consumo de energía eléctrica.

Por lo tanto, se tienen dos tipos de energía que proporcionan al dispositivo de enfriamiento un periodo de tiempo de autonomía de la red eléctrica convencional: eléctrica y térmica. La energía eléctrica, producida a partir de una fuente de energía renovable como la solar y almacenada en baterías, y la térmica, que se almacena en un material de cambio de fase.

Por consiguiente, el uso del PCM en el área de la refrigeración híbrida se debe de considerar como un complemento y no como un sustituto de las baterías encargadas de almacenar energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos.

- **Impacto ambiental, social y económico de los sistemas de refrigeración termoeléctricos.**

Los sistemas de refrigeración que utilizan el efecto Peltier como principio de funcionamiento, no producen un efecto negativo directo en el medio ambiente, es decir durante su funcionamiento no se desprenden gases perjudiciales para la capa de ozono, ya que el sistema de enfriamiento excluye el uso de CFC, HCFC y freones. En su lugar, se utilizan dispositivos de estado sólido para el enfriamiento. Sin embargo, estos sistemas de refrigeración contribuyen con el aumento del efecto invernadero al consumir una gran cantidad de energía eléctrica, la cual se produce a partir de combustibles fósiles.

La eliminación y prohibición del uso de los CFC e HCFC crea nuevas oportunidades de investigación para ser desarrolladas por universidades e industrias, ya que representan nuevos retos que se deben afrontar a través de la generación de propuestas de solución alternativas en el área de la refrigeración doméstica e industrial, como respuesta a los problemas relacionados con la eficiencia de los sistemas de refrigeración, capacidades de refrigeración, rangos de temperaturas de trabajo y toxicidad de los gases frigorígenos.

8. TRABAJO FUTURO

A partir de los resultados obtenidos, en la presente tesis se exponen las siguientes actividades como trabajo futuro:

1. Llevar a cabo una segunda etapa de pruebas experimentales utilizando un diseño de experimentos de un solo factor con un diseño completamente al azar (DCA) y una técnica de análisis de datos conocida como análisis de varianza (ANOVA).

El objetivo de la segunda etapa consiste en comparar las respuestas con diferentes niveles de los factores controlables. Esto es, a partir de la configuración seleccionada en la primera etapa del diseño de experimentos, se propone realizar pruebas con diferentes niveles de voltaje de operación (máximo, nominal y mínimo) del dispositivo de enfriamiento para determinar el ciclo de funcionamiento óptimo del sistema.

2. Realizar pruebas con diferentes espesores del contenedor de PCM para determinar si tiene un efecto significativo en el tiempo de autonomía del dispositivo de enfriamiento.
3. Realizar pruebas experimentales con materiales de cambio de fase que presenten mayor capacidad calorífica e inercia térmica y evaluar su efecto en el tiempo de autonomía del dispositivo de enfriamiento.
4. Rediseño del contenedor de PCM: material, geometría, dimensiones y número de aletas para aumentar la transferencia de calor.
5. Realizar pruebas experimentales con diferentes alternativas de distribución de los ensambles termoeléctricos en la estructura del dispositivo de enfriamiento y evaluar su efecto en la temperatura interior.

9. REFERENCIAS

Agogino, A.M., Beckman, S.L., Borja, V., López, M., Shedroff, N., Ramírez, A.C. (2008a), Teaching Multinational, Multidisciplinary Sustainable Product Design, *Proceedings of the 20th International Conference on Design Theory and Methodology*, DTM 2008, August 3-6, 2008, New York City, New York, U.S.A, ASME.

Agogino, A.M., Beckman, S.L., Borja, V., y Shedroff, N. (2008b). Syllabus of the course ME 290P-1, MBA 290N-2, y CCA UDIST-300-14, *Managing the New Product Development Process: Design Theory and Methods*, University of California, Berkeley, U.S.A.

Borja, V., Agogino, A.M., Beckman, S.L., López, M., Shedroff, N., Ramírez, A.C. (2008). Curso de Diseño para Sustentabilidad: caso de estudio de enseñanza multidisciplinaria y binacional, *XIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM 2008*, Septiembre 17-19, 2008, Puebla, Pue., México.

Bello, J. (2000). *Ciencia bromatológica-Principios generales de los alimentos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

Borja, V. y Ramírez A. C. (2006). *Cuadernos de gestión de tecnología. Innovación de producto*. México: Premio Nacional de Tecnología.

Cengel, Y. A. y Boles, M. A. eds. (1996). *Termodinámica*. 2^{da} ed. México: McGraw-Hill.

Comisión Federal de Electricidad. (2010). Tarifa H-S (2009-2010) [Online]. (Última fecha de actualización: 1 de julio de 2010). Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/Paginas/Tarifas.aspx>. [Fecha de acceso: julio de 2010].

Crul, M. R. y Diehl, J. C. (2007). *Design for Sustainability: A practical approach for developing economies*. [e-book]. The Neatherlands: Delft University of Technology, Faculty of Industrial Design Engineering. Disponible en: <http://www.d4s-de.org/> [Fecha de acceso: abril de 2009].

Free Patents Online. *Search Patents*. [Online]. Disponible en: <http://www.freepatentsonline.com/search.html> [Fecha de acceso: mayo de 2009].

Gómez, L. et al. (2009). Diseño de nuevos productos con un enfoque orientado al usuario, *XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM 2009*, Septiembre 23-25, 2009, Cd. Obregón, Sonora, México.

Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. 2^{da} ed. México: Mc Graw Hill.

Kenneth, J. A. (2004). *Phillip's science of dental materials*. 11^a ed. España: Elsevier.

9. REFERENCIAS

Kreith, F. y Bohn, M. S. (2001). *Principios de transferencia de calor*. 6ª ed. México: Thomson Learning.

Lunar Design, Inc., 2006. *The designer's field guide for sustainability: An overview of sustainable product development and the product life cycle*. [Online]. Disponible en: http://www.lunar.com/docs/the_designers_field_guide_to_sustainability_v1.pdf [Fecha de acceso: mayo de 2009].

Melgarejo, P. (1995). *Aislamiento, cálculo y construcción de cámaras frigoríficas*. Madrid: A. Madrid Vicente.

Navarro, J. et al. (2003). *Fluidos y refrigerantes, tablas y diagramas*. Madrid: A. Madrid Vicente.

Pérez, G. (2010). *Diseño y construcción de enser híbrido de aplicación residencial*, Tesis de maestría en Ingeniería Mecánica-Diseño Mecánico, UNAM. México.

Riba, C. (2002). *Diseño concurrente*. España: Ediciones UPC.

Secretaría de energía. *Normas Oficiales Mexicanas - Eficiencia energética*. [Online]. Disponible en: <http://www.sener.gob.mx/webSener/portal/index.jsp?id=19>. [Fecha de acceso: septiembre de 2009].

Solar Energy International. ed. (2008). *Photovoltaics: Design and Installation Manual*. 3ra ed. Canadá: New Society Publishers.

Torrella, E. (1996). *La producción del frío*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Ulrich, K.T. y Eppinger, S.D. (2008). *Product Design and Development*. 4ª ed. EE.UU: Mc Graw Hill.

World Intellectual Property Organization. *Search International Patent Applications*. [Online]. Disponible en: <http://www.wipo.int/pctdb/en/> [Fecha de acceso: mayo de 2009].

10. BIBLIOGRAFÍA

Abdul-Wahab, S. A. et al. (2009). *Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator*, [Online]. 34 (2009), p. 30-34. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/renene> (ScienceDirect) [Fecha de acceso: enero de 2010].

Dai, Y. J. et al. (2003). *Experimental investigation on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells*, [online]. 28 (2003), p. 949-959. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/renene> (ScienceDirect) [Fecha de acceso: enero de 2010].

Foster E.R. et al., (s.f.). *Refrigeradores fotovoltaicos de uso directo en México*. [Internet]. Disponible en: http://solar.nmsu.edu/publications/ANES_PV_.pdf [Fecha de acceso: abril de 2009].

Hernández, E. (2009). *Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración*. México: Limusa.

Lijó, J.M. (2006). *Manual de refrigeración*. Barcelona: Reverté.

Min, G. y Rowe, D. M. (2005). *Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators*, [Online]. 83 (2006), p. 133-152. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/apenergy> (ScienceDirect) [Fecha de acceso: febrero de 2010].

Omer, S.A. et al. (2001). *Experimental investigation of a thermoelectric of a refrigeration system employing a phase change material integrated with thermal diode (thermosyphons)*, [Online]. 21 (2001), p. 1265-1271. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/apthermeng> (ScienceDirect) [Fecha de acceso: diciembre de 2009].

Pinazo, J. M. (1995). *Cálculos en instalaciones frigoríficas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Pita, E. G. ed. (1991). *Principios y sistemas de refrigeración*. México: Limusa.

Sofrata, H. (1995). *Heat rejection alternatives for thermoelectric refrigerators*, [Online]. 37 (3), p. 269-280. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/> [Fecha de acceso: enero de 2010].