

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA EL  
CONTROL Y ANÁLISIS DE DESCONGELAMIENTO EN UN SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN**

**CARLOS AUGUSTO ORTIZ ORTIZ  
DIEGO ENRIQUE PINZÓN ABRIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2016**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA EL  
CONTROL Y ANÁLISIS DE DESCONGELAMIENTO EN UN SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN**

**CARLOS AUGUSTO ORTIZ ORTIZ  
DIEGO ENRIQUE PINZÓN ABRIL**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2016**

## DEDICATORIA

*A Dios, que sin él nada hubiera sido posible.*

*A mis padres por su inmenso amor y comprensión, al igual que mis familiares que me dieron su apoyo durante toda mi etapa universitaria.*

*A mi hijo Juan Diego que amo con toda mi alma, ya que fue el motor e inspiración para realizar ese sueño.*

*A mis compañeros de carrera y amigos, quienes que aportaron un granito de arena en este proceso.*

***Diego Enrique Pinzón Abril***

## ***Dedicatoria***

*Este proyecto de grado va dedicado a Dios por brindarme conocimiento y guiarme en la realización y finalización de la carrera.*

*A mis padres por cada día en su enorme sacrificio y por brindarme las herramientas para la consecución de la carrera.*

*A mi novia por esos momentos agradables durante los 5 años de la universidad y que con su apoyo me impulso a salir adelante en los momentos más difíciles.*

*A mis amigos de carrera que con los cuales superamos cada inconveniente y logramos sacar una sonrisa a cada circunstancia por mala o buena que fuera.*

*Finalmente gracias a las personas que directa o indirectamente contribuyeron a formarme como Ingeniero Mecánico.*

***Carlos Augusto Ortiz Ortiz***

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente agradecerle al profesor e ingeniero mecánico Omar Armando Gelvez Arocha por su paciencia y esfuerzo en el transcurso del proyecto de grado, por brindarnos su apoyo para superar cada inconveniente.

Al técnico en refrigeración Luciano Poveda de la empresa AVIDESA Mac Pollo S.A. por ayudarnos en el diseño y construcción del banco de laboratorio en su totalidad. Por ofrecernos su conocimiento en lo que se refiere a sistemas de refrigeración y las prevenciones que hay que tener en cuenta en la construcción de cámaras de congelación. A su señora esposa y familiares por el carisma y sencillez.

Al señor Eduardo Murillo que por medio de su taller metalmecánico, en corto tiempo nos construyó la estructura del banco de pruebas.

Al cuerpo administrativo de la Escuela de Ingeniería Mecánica especialmente a María René Barreto, por su carisma, por su ayuda en los días finales de entrega y por ese gran corazón que tiene.

## CONTENIDO

pág

INTRODUCCIÓN .....	23
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	25
1.1. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA.....	26
1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	27
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	27
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	27
2. DESCONGELAMIENTO Y FORMACION DE ESCARCHA EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN .....	30
2.1. FORMACIÓN DE ESCARCHA .....	30
2.2. MÉTODOS DE DESCONGELAMIENTO .....	31
2.2.1 Etapas en un proceso de descongelamiento .....	32
2.2.1.1. Encendido de Compresor y Válvula solenoide línea de líquido.....	32
2.2.1.2. Retardo del ventilador .....	32
2.2.1.3. Apagado compresor, ventilador y válvula solenoide línea de líquido .....	33
2.2.1.4. Energizar dispositivos de descongelamiento .....	33
2.2.1.5. Tiempo de goteo .....	33
2.2.2 Descongelamiento por resistencia eléctrica .....	34
2.2.3 Descongelamiento por gas caliente .....	36
3. DISEÑO DEL BANCO DE EXPERIMENTAL.....	39
3.1. DISEÑO ESTRUCTURAL .....	39
3.1.1. Mesa de Trabajo .....	40
3.1.2. Cámara de Congelación.....	40
3.2. DISEÑO TÉRMICO .....	41
3.2.1. Tipo de instalación .....	41

3.2.2.	Situación geográfica de la instalación .....	41
3.2.3.	Determinación de las temperaturas.....	43
3.2.3.1.	Temperatura Ambiente.....	43
3.2.3.2.	Temperatura cámara de congelación.....	43
3.2.3.3.	Temperatura de evaporización.....	43
3.2.3.4.	Temperatura de condensación.....	44
3.2.4.	Cálculo de carga del sistema .....	44
3.2.4.1.	Calculo de carga a través de las paredes .....	45
3.2.4.2.	Cálculo de pérdidas por servicio de apertura de puertas .....	47
3.2.4.3.	Cálculo de pérdidas servicio de equipos y luminación en cámara .....	48
3.2.4.4.	Cálculo de pérdidas por almacenamiento de agua .....	49
3.2.4.5.	Carga total del sistema.....	51
3.2.5.	Cálculos para selección de los elementos de refrigeración.....	53
3.2.5.1.	Compresor .....	53
3.2.5.2.	Evaporador.....	54
3.2.5.3.	Condensador.....	56
3.2.5.4.	Tubo Capilar.....	59
3.2.3.	Selección de los elementos del sistema refrigeración.....	61
3.2.3.1.	Compresor .....	61
3.2.3.2.	Condensador.....	62
3.2.3.3.	Evaporador.....	63
3.2.3.4.	Tubo capilar .....	64
3.2.3.5.	Válvulas solenoide .....	65
3.2.3.6.	Tipo de refrigerante .....	67
3.2.3.7.	Filtro Deshidratador.....	69
4.	CONTROL DE DESCONGELAMIENTO .....	70
4.1.	OPERACIONES DEL CONTROLADOR.....	71
4.1.1.	Funciones del Controlador .....	73
4.1.2.	Descripción de los parámetros.....	75

4.2. CONEXIONES ELÉCTRICAS .....	78
4.2.1. Consideraciones al montaje eléctrico.....	79
4.3. CONTROL POR NECESIDAD.....	80
4.3.1. Control por necesidad en gas caliente. Escenario1 .....	80
4.3.1.1. Parámetros de las funciones para realizar escenario 1.....	81
4.3.2. Control por necesidad en resistencia eléctrica escenario 2 .....	82
4.3.2.1. Parámetros de las funciones para realizar escenario 2.....	83
4.4. CONTROL POR TIEMPO.....	83
4.4.1. Control por tiempo en gas caliente escenario 3 .....	84
4.4.1.1. Parámetros de funciones para realizar escenario 3.....	85
4.4.2. Control por tiempo en resistencia eléctrica escenario 4.....	85
4.4.2.1. Parámetros de las funciones para realizar escenario 4.....	86
5. INTERFAZ.....	87
5.1. DISEÑO DE LA INTERFAZ .....	87
5.1.1. Subsistemas de la interfaz .....	88
5.2. SIMULACIÓN .....	91
5.2.1. Simulación manual.....	91
5.2.2. Simulación automática .....	92
5.2.3. Simulación por adquisición de datos.....	93
5.2.3.1. Adquisición de datos .....	93
6. PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	95
6.1. TIEMPOS DE REFRIGERACIÓN Y DESCONGELAMIENTO .....	96
6.2. CONSUMO ENERGETICO DEL SISTEMA .....	100
6.2.1. Determinación de la potencia.....	101
6.2.1.1. Potencia total consumida escenario 1. Gas Caliente - Temperatura .....	103
6.2.1.2. Potencia total consumida escenario 2. Resistencia – Temperatura.....	104
6.2.1.3. Potencia total consumida escenario 3. Gas caliente – Tiempo .....	105
6.2.1.4. Potencia total consumida escenario 4. Resistencia – Tiempo .....	106
6.2.2. Determinación del consumo de energía.....	109

6.2.2.1. Consumo energético escenario 1. Gas caliente – Temperatura .....	110
6.2.2.2. Consumo energético escenario 2. Resistencia – Temperatura.....	110
6.2.2.3. Consumo energético escenario 3. Gas caliente – Tiempo .....	111
6.2.2.4. Consumo energético escenario 4. Resistencia – Tiempo .....	111
6.2.3. Determinación del costo de la energía .....	114
6.3. COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y CONDENSACIÓN.....	116
6.3.1. Determinación de las presiones según la prueba de control.....	117
6.3.1.1. Comportamiento de presiones escenario 1. Gas calienteTemperatura...	118
6.3.1.2. Comportamiento de las presiones Escenario 2 ResistenciTemperatura	119
6.1.2.3. Comportamiento de presiones escenario 3. Gas caliente - Tiempo.....	120
`6.1.2.4. Comportamiento de presiones escenario 4. Resistencia -Tiempo.....	121
7. GUIA DEL ESTUDIANTE .....	124
8. CONCLUSIONES .....	125
9. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	126
BIBLIOGRAFIA .....	128
ANEXOS.....	127

## LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Formación de escarcha en el serpentín del evaporador.....	25
Figura 2. Esquema del prototipo del banco de descongelamiento .....	29
Figura 3. Etapas de un sistema de refrigeración que requiera descongelamiento	32
Figura 4. Esquema del descongelamiento eléctrico.....	34
Figura 5. Estados de los componentes en la etapa de descongelamiento por resistencia eléctrica .....	35
Figura 6. Esquema del descongelamiento por gas caliente.....	37
Figura 7. Estados de los componentes en la etapa de descongelamiento por gas caliente .....	38
Figura 8. Cámara de congelación empleada en el banco de pruebas.....	40
Figura 9. Ficha climatológica de Temperaturas en Universidad Industrial de Santander (IDEAM).....	42
Figura 10. Ficha climatológica de Humedad Relativa en la Universidad Industrial de Santander (IDEAM).....	42
Figura 11. Variación de temperatura del aire cuando se condensa en un intercambiador de calor .....	57
Figura 12 Interfaz para selección del tubo capilar.....	60
Figura 13. Compresor Mabe .....	62
Figura 14. Tubo capilar del banco de pruebas.....	64

Figura 15. Válvulas solenoides del banco de pruebas.....	65
Figura 16. Filtro deshidratador hércules ¼ [in].....	69
Figura 17. Controlado Full Gauge TC-900e Power.....	70
Figura 18. Indicaciones y teclas controlador.....	71
Figura 19. Operaciones por menú facilitado.....	71
Figura 20 Conexión eléctrica del controlador sin modificar.....	78
Figura 21. Conexión eléctrica del controlador modificado.....	78
Figura 22 Etapas de descongelamiento con parámetros cuando es controlado por temperatura F39=1.....	81
Figura 23 Etapas de descongelamiento con parámetros cuando es controlado por tiempo F39=0.....	84
Figura 24. Panel frontal interfaz.....	90
Figura 25. Elemento que debe manipular para llevar a cabo simulación manual..	91
Figura 26. Conexión termocupla tipo J con NI cRIO-9211.....	94
Figura 27. Modulo Crio-9075. (Chasis de módulos).....	94
Figura 28. Modelo para el registro de datos.....	100
Figura 29. Triangulo de potencias.....	101
Figura 30. Toma de corriente del banco de pruebas con la pinza amperimétrica	102
Figura 31. Potencia Total Consumida 1ra Prueba. Gas Caliente – Temperatura	103
Figura 32. Potencia total Consumida 2da Prueba. Gas Caliente – Temperatura	103
Figura 33. Potencia total Consumida 1ra Prueba. Resistencia – Temperatura ...	104
Figura 34. Potencia total Consumida 2da Prueba. Resistencia – Temperatura...	104
Figura 35. Potencia Total Consumida 1ra Prueba. Gas Caliente – Tiempo.....	105

Figura 36. Potencia Total Consumida 2da Prueba. Gas Caliente - Tiempo.....	105
Figura 37. Potencia total Consumida 1ra Prueba. Resistencia – Tiempo .....	106
Figura 38. Potencia total Consumida 2da Prueba. Resistencia – Tiempo .....	106
Figura 39. Potencia total consumida ciclo de operación. Gas Caliente Tiempo ..	107
Figura 40. Comparación consumo energético .....	112
Figura 41. Costo de la energía mensual para el banco de pruebas.....	115
Figura 42. Diagrama Presión vs Entalpía ciclo de refrigeración real.....	116
Figura 43. Presión vs Tiempo. Primera prueba Gas Caliente Temperatura .....	118
Figura 44. Presión vs Tiempo. Segunda prueba Resistencia- Temperatura.....	119
Figura 45. Presión vs Tiempo. Segunda prueba Gas caliente - Tiempo.....	120
Figura 46. Presión vs Tiempo. Segunda prueba Resistencia - Tiempo .....	121

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Componentes banco de descongelamiento .....	28
Tabla 2. Escenarios de pruebas .....	29
Tabla 3. Métodos de descongelamiento. ....	31
Tabla 4. Características climatológicas de la Universidad industrial de Santander – Bucaramanga.....	41
Tabla 5. Calor filtrado a través de pared.....	47
Tabla 6. Carga total del sistema .....	52
Tabla 7. Factores de rechazo de calor: compresores herméticos de enfriamiento en la succión.....	56
Tabla 8. Datasheet compresor Mabe C-BZN122L7G de 1/5 HP .....	61
Tabla 9. Área total del condensador .....	62
Tabla 10. Área total del Evaporador .....	63
Tabla 11. Especificaciones válvula solenoide Danfoss.....	66
Tabla 12. Funciones del controlador.....	74
Tabla 13. Estado de los componentes al iniciar descongelamiento gas caliente...80	
Tabla 14. Configuración de los parámetros para el descongelamiento por temperatura y gas caliente.....	82
Tabla 15. Estado de los componentes al iniciar descongelamiento por resistencia eléctrica. ....	82

Tabla 16. Configuración de los parámetros para el descongelamiento por temperatura y resistencia eléctrica. ....	83
Tabla 17. Configuración de los parámetros para el descongelamiento por tiempo y gas caliente.....	85
Tabla 18. Configuración de los parámetros para el descongelamiento por tiempo y resistencia eléctrica .....	86
Tabla 19. Escenarios de prueba del banco experimental .....	95
Tabla 20. Duración de cada etapa en los escenarios 3 y 4 .....	96
Tabla 21. Duración de etapas por ciclos de operación prueba 1 del escenario 1 ..	97
Tabla 22. Duración de etapas por ciclos de operación prueba 2 del escenario 1 ..	97
Tabla 23. Duración las etapas por ciclos de operación en prueba 1 escenario 2 ..	98
Tabla 24. Duración de etapas por ciclos de operación prueba 2 del escenario 2 ..	98
Tabla 25. Duración total de cada etapa en escenario 1.....	99
Tabla 26. Duración total de cada etapa en escenario 2.....	99
Tabla 27. Consumo energético total en 4 horas. Escenario 1 .....	110
Tabla 28. Consumo energético total en 4 horas. Escenario 2 .....	110
Tabla 29. Consumo energético total en 4 horas. Escenario 3 .....	111
Tabla 30. Consumo energético total en 4 horas. Escenario 4 .....	111
Tabla 31. Consumo energético en una hora de trabajo .....	114
Tabla 32. Parámetros para realizar por tiempo los escenarios de prueba .....	117
Tabla 33. Parámetros para realizar por temperatura los escenarios de prueba ..	117
Tabla 34. Valores de tiempo, presión y temperatura a partir de la gráfica del escenario 1. ....	118

Tabla 35. Valores de tiempo, presión y temperatura a partir de la gráfica del escenario 2. ....119

Tabla 36. Valores de tiempo, presión y temperatura a partir de la gráfica del escenario 3. ....120

Tabla 37. Valores de tiempo, presión y temperatura a partir de la gráfica del escenario 4. ....121

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Manual de controlador digital para refrigeración y deshielo TC-900e Power.....	130
ANEXO B. Registro de datos de la potencia total del banco experimental para las dos pruebas de los cuatro escenarios.....	131
ANEXO C. Registro de datos de la presión de evaporización y presión de condensación a través del tiempo de trabajo para las dos pruebas de los cuatro escenarios.....	132
ANEXO D. Guía del Estudiante.....	133
ANEXO E. Hoja de datos para el registro de variables que se miden durante la práctica.....	134

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA EL CONTROL Y ANÁLISIS DE DESCONGELAMIENTO EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN\*.**

### **AUTORES:**

Carlos Augusto Ortiz Ortiz.  
Diego Enrique Pinzón Abril\*\*.

### **PALABRAS CLAVES:**

Controlador, consumo de potencia, descongelamiento, refrigeración.

### **DESCRIPCIÓN:**

El objetivo principal es entregar al laboratorio de refrigeración y aire acondicionado un banco experimental con el cual los estudiantes puedan observar de manera didáctica la formación de escarcha en el evaporador mediante un sistema de compresión de vapor, al igual que los tipos de descongelamiento con su respectivo análisis de consumo de potencia y comportamiento de presiones.

Se realizan 4 pruebas con diferentes escenarios, según por temperatura o tiempo conforme la necesidad y el tipo de descongelamiento, ya sea gas caliente o resistencia eléctrica. Realizadas mediante un controlador full gauge TC-900e power, el cual se le ajustan los parámetros según el escenario a trabajar. Durante las pruebas realizadas se adquieren las presiones de condensación y evaporización, al mismo tiempo se registran los datos de potencia consumida mediante una pinza amperimétrica. Asimismo se dota a los estudiantes con una interfaz en LabVIEW, para que los estudiantes puedan visualizar la prueba a realizar y recopilar los datos obtenidos.

De esta manera se pudo concluir con los resultados obtenidos que el mejor método de descongelamiento para sistemas de baja potencia es el de resistencia con tiempo, debido a que es un sistema más económico. Por último se realiza una guía de laboratorio con el fin de que los estudiantes puedan tener una metodología y registrar los datos adquiridos en la práctica.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director. Omar Armando Gelvez Arocha, Ingeniero Mecánico.

## ABSTRACT

### TITLE

**DESIGN AND CONSTRUCTION LABORATORY'S BENCH FOR THE CONTROL AND ANALYSIS OF DEFROSTING IN A REFRIGERATION SYSTEM\*.**

### AUTHORS:

Carlos Augusto Ortiz Ortiz.  
Diego Enrique Pinzón Abril\*\*.

### KEY WORDS:

Controller, defrosting, power consumption, refrigeration.

### DESCRIPTION

The main objective is give an experimental bench to the laboratory of refrigeration and air conditioning, in order to the students can look in didactic way the frost formation in the evaporator, the types of defrosting, the power consumption and the behavior of pressure in a steam compression system.

Four tests are developed with different sceneries, according to temperature and time depending to the requirement or the types of defrosting like hot gas or by an electrical resistance. These tests are implemented with a controller FullGauge TC-900e Power adjusted to the parameters according to the working scenery. During the tests are taken the value of the condensation pressure and evaporation pressure, likewise, the data of power consumption with an amperometric clamp. It also it's given to the students an interfaz in LabVIEW for the visualization the test and collect the data registered.

In this way in conclusion the best method of defrosting for system de low power is the electrical resistance when is controlled for time due is an economic system. Finally, is realized a guide for the students can look a methodology and registered the data obtained in the practice.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director. Omar Armando Gelvez Arocha, Ingeniero Mecánico

## INTRODUCCIÓN

Durante la etapa universitaria se obtienen muchos conocimientos los cuales parten de tener claro el concepto del tema a abordar. Con este proyecto lo que se quiere es llegar más lejos de la teoría, con lo cual se le brinda al estudiante la oportunidad de presenciar el verdadero comportamiento de los sistemas de refrigeración en procesos reales de la industria.

En la industria frigorífica se debe tener claro a la hora de hacer el diseño de un sistema de refrigeración el cálculo de cargas del sistema para seleccionar los componentes indicados, el tipo de refrigerante y el tipo de descongelamiento que se emplea. Todo esto se selecciona de acuerdo a dos parámetros, que cumpla con los requisitos mínimos del sistema y cuál método de descongelamiento es más económico.

Los sistemas de refrigeración requieren de un sistema de descongelamiento el cual es necesario para evitar perder eficiencia en la operación del sistema e impedir el exceso de escarcha en el evaporador. Existen varios métodos de descongelamiento y para el caso de este proyecto solo se tiene en cuenta el descongelamiento por gas caliente y descongelamiento por resistencia eléctrica.

Partiendo de esta premisa, lo que se busca con este proyecto es determinar cuál de los dos métodos es el más eficiente y económico de implementar. Para ello se parte de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, donde se hace un diseño estructural del sistema, un cálculo de cargas, según las dimensiones de la cámara de congelación, el servicio a prestar y los elementos que aportan calor al evaporador. Una vez obtenida la capacidad total a retirar, se procede con la selección de los componentes del sistema. Ya terminada toda la parte de selección y montaje del sistema se procede a la realización de pruebas.

Ahora la atención se centra en la metodología de las pruebas. Para la realización de estas prácticas se plantearon cuatro escenarios distribuidos por necesidad y tiempo y por los dos métodos de descongelamiento. Estos cuatro escenarios serán programados por el controlador Full Gauge TC-900e Power, el cual permite seleccionar el escenario a analizar. Se registran las temperaturas de evaporización y condensación, para así poder graficar por medio de LabVIEW el comportamiento de las presiones de alta y baja, en el transcurso del tiempo.

En el transcurso de todas las etapas se lleva un registro de la potencia total consumida por el banco, medida con una pinza amperimétrica para poder determinar cuál de los dos métodos es el que consume mayor energía, para así determinar el método más económico para la implementación del sistema. Por último se busca guiar al estudiante en la práctica del laboratorio con una guía teórico-práctica, en la cual se encuentra un marco teórico acerca del proceso de refrigeración, parámetros para llevar a cabo cada escenario de prueba y una hoja de datos donde puedan registrar las variables.

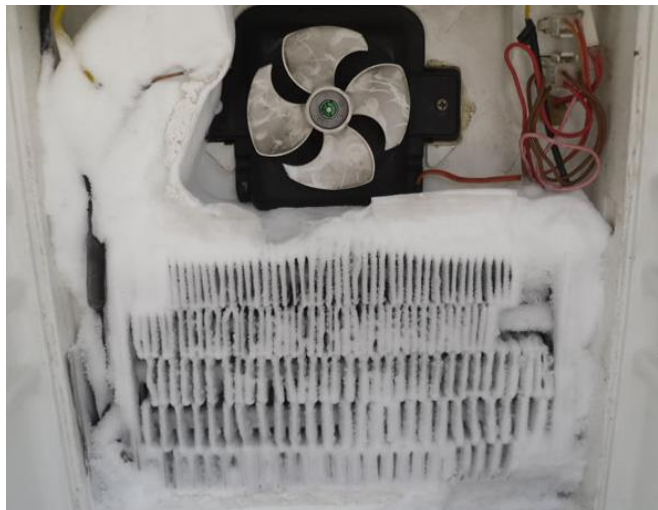
Para finalizar se encontrarán todas las conclusiones y observaciones pertinentes, las cuales presentarán los alcances obtenidos durante la etapa de realización del proyecto, al igual que unas recomendaciones a la hora de realizar las prácticas.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La formación de escarcha en los evaporadores es una desventaja para el funcionamiento de los sistemas de refrigeración, debido a que con el transcurso del tiempo se produce acumulación de escarcha en las paredes del evaporador, a tal punto que genera efectos inadecuados tales como:

- Ocasionan que descienda la temperatura del refrigerante en ebullición en el interior del evaporador.
- Disminuye la producción frigorífica.
- Llegada de líquido al compresor.
- Aumenta el tiempo de funcionamiento del equipo.
- Elevación del grado higrométrico adecuado para la buena conservación de los géneros almacenados

Figura 1. Formación de escarcha en el serpentín del evaporador



Fuente: disponible en: <http://fallaselectronicas.blogspot.com/2011/02/refrigerador-se-llena-con-hielo.html>

En las aplicaciones donde la temperatura de evaporación es baja y por lo tanto la temperatura de superficie, como en el caso de los frigoríficos, la formación de escarcha sobre el evaporador será inevitable.

Debido a que los estudiantes no tienen la posibilidad de observar los inconvenientes y soluciones presentados en los sistemas de refrigeración en el área de refrigeración y aire acondicionado, se propone como propósito fundamental del proyecto dotar a la escuela de Ingeniería Mecánica de un banco de pruebas para visualizar la formación de escarcha y los distintos métodos de descongelamiento que se presentan siendo controlados electrónicamente o manualmente.

### **1.1. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA**

Las prácticas de laboratorio tienen como objetivo integrar al estudiante a la realidad para fortalecer los conocimientos aprendidos en el aula de clase. Cada laboratorio tiene como propósito mostrar al estudiantado los distintos problemas que se presentan, ¿Cómo ocurre?, ¿Por qué ocurre? y ¿Cómo hago para solucionar cada inconveniente? Cada cuestionamiento es debatido y solucionado tanto auxiliar-estudiante, profesor-estudiante y adquirir un nivel más alto en lo que corresponde al aprendizaje.

Lo que se busca con este proyecto es poder entrelazar aún más la teoría con lo experimental y poder seguir moldeando una base sólida del conocimiento tanto para la vida laboral como la profesional.

Se propone la construcción de un banco de pruebas con el fin de proveer a la Escuela de Ingeniería Mecánica un apoyo al estudiante y brindar la posibilidad de observar el descongelamiento presentado en el evaporador el cual será controlado por un dispositivo que regula las formaciones de escarcha y automatiza los procesos de acuerdo con la necesidad de la instalación, proporcionando gran economía de energía. Este banco de pruebas le permite al estudiante visualizar la escarcha

formada en el evaporador, manipular y elegir los métodos de descongelamiento y tipos de control para dar fin a la escarcha y así comprender el comportamiento presentado en cada caso.

## **1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Aportar al continuo aprendizaje de los estudiantes de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander en el área de refrigeración y aire acondicionado, a continuar con la misión de crear ingenieros mecánicos de alta calidad, técnica y científica mediante la implementación de un banco en el laboratorio permitiéndole al estudiante que interactúe, analice y comprenda los distintos métodos de descongelamiento y tipos de control.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

✓ Diseñar y Construir un banco de pruebas para el análisis de descongelamiento de un evaporador en un sistema de refrigeración con las siguientes características:

Métodos de descongelamiento:

- Gas caliente
- Resistencia Eléctrica

Tipos de control del descongelamiento por Full Gauge<sup>1</sup>:

- Control por tiempo
- Control por necesidad

Componentes y capacidad del sistema:

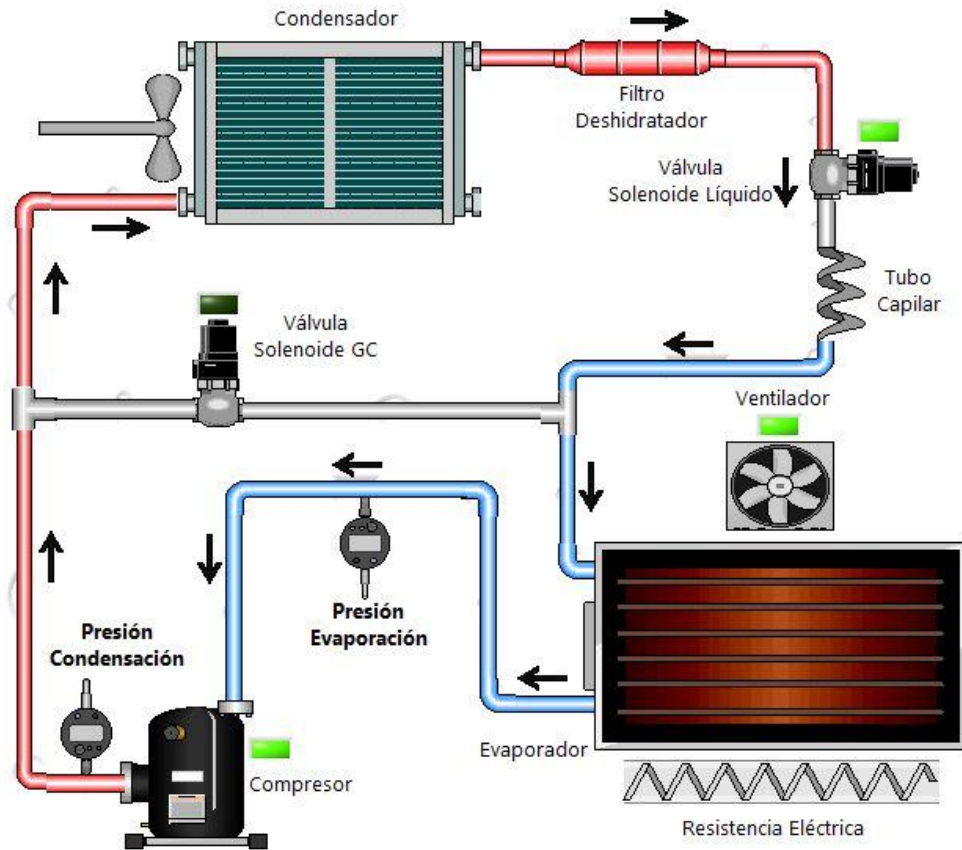
Tabla 1. Componentes banco de descongelamiento

No.	COMPONENTES	REFERENCIA
<b>Sistema de refrigeración</b>		
1	Condensador	1272.5 [BTU/H]
2	Evaporador	509 [BTU/H]
3	Compresor	1/5 HP
4	Tubo Capilar	
<b>Subsistema de elementos auxiliares</b>		
5	Válvula solenoide (Línea líquido)	DANFOSS EV210B 3/8 N.C
6	Válvula solenoide (Bypass Gas caliente)	DANFOSS EV210B N.C
7	Filtro Deshidratador	Hércules
<b>Subsistema de control</b>		
8	Controlador de descongelamiento	Full Gauge TC-900e power

---

<sup>1</sup> El controlador Full Gauge posee dos sensores, uno localizado en el evaporador y otro localizado a medio ambiente. Este controlador opera a 110 [V] y tiene las debidas conexiones al compresor, ventilador y descongelamiento. Estas conexiones permiten que sea un proceso consecutivo y se lleva paso a paso para obtener un óptimo desempeño con un margen de error mínimo. La ventaja de este controlador es que la calibración es manual, dándole la posibilidad al usuario de digitar el set point que desee. Véase ANEXO A.

Figura 2. Esquema del prototipo del banco de descongelamiento



Fuente: Autores

✓ Realizar un análisis comparativo del consumo energético del sistema para así determinar qué tipo de método y control es más económico en los sistemas de refrigeración que requieren descongelamiento, además, a través de LabVIEW graficar la variación de las presiones de evaporización y de condensación en tiempo real durante 4 horas continuas de ciclos de trabajo bajo los siguientes escenarios.

Tabla 2. Escenarios de pruebas

	Necesidad	Tiempo
Gas Caliente	Escenario 1	Escenario 3
Resistencia Eléctrica	Escenario 2	Escenario 4

✓ Elaborar una guía para los estudiantes de la asignatura refrigeración y aire acondicionado para que lleven a cabo la práctica donde se especifiquen las variables a medir y poder llevar una metodología adecuada en las 4 pruebas establecidas.

## **2. DESCONGELAMIENTO Y FORMACION DE ESCARCHA EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN**

### **2.1. FORMACIÓN DE ESCARCHA**

Debido a que la formación de escarcha presentada en el evaporador viene dada por la interacción de la humedad del ambiente donde está localizado el sistema de refrigeración y por la superficie del serpentín que se encuentra a muy baja temperatura, se hace necesario la implementación de distintos controles y métodos de descongelamiento que generan una confiabilidad de que el sistema de refrigeración está trabajando en óptimas condiciones.

A medida que transcurre el tiempo se genera una escarcha que al principio beneficia el funcionamiento del sistema ya que se incrementa de forma sustancial la superficie de intercambio de calor a transferir pero, esta escarcha aumenta capa tras capa lo que ocasiona una disminución drástica de la velocidad del aire entre las aletas del evaporador perdiéndose potencia frigorífica y el coeficiente de transferencia calor disminuye, dificultando el trabajo efectuado en el evaporador lo que causa un corte en la instalación del presostato de baja y por ende el sistema de refrigeración trabajará inadecuadamente ya que el enfriamiento es pobre.

## 2.2. MÉTODOS DE DESCONGELAMIENTO

Para eliminar la escarcha que se forma en los evaporadores, hay que realizar un aporte de calor que permita la fusión del hielo. Dicho aporte de calor puede darse tanto desde dentro del evaporador como desde fuera de él. El calor se puede aportar de cualquier foco con temperatura positiva. Puede ser aire, agua, resistencias eléctricas energizadas a tal fin, gas caliente procedente de la descarga del compresor o líquido caliente procedente del recipiente de líquido.<sup>2</sup>

De acuerdo con la forma en que se procede para obtener la fusión de la escarcha, se logra clasificar en dos grandes grupos los métodos de descongelamiento (ver tabla 3)

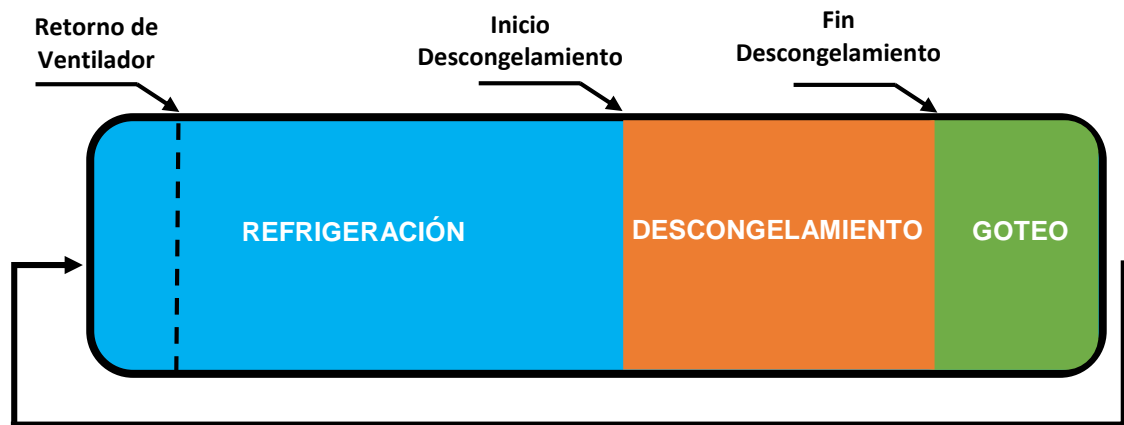
Tabla 3. Métodos de descongelamiento.

Procedimientos	Métodos de descongelamiento	Tipo de Control	Dispositivo de Control
Externos	Manual (Raspado o cepillado)	Necesidad	Manualmente y/o Temporizador
	Paro de la máquina y calentamiento natural de los evaporadores.		
	Paro de la máquina y circulación de aire forzado sobre el evaporador.		
	Aspersión o pulverización de agua.		
	Calentamiento eléctrico del aire que circula sobre el evaporador, a la parada de la máquina.		
Internos	Resistencia eléctrica.	Tiempo y/o necesidad	Termostato y/o Temporizador
	Gas caliente.		
	Inversión de ciclo.		

<sup>2</sup> SAENZ, Felix. Desencarhe por gas caliente. DANFOSS S.A.

**2.2.1 Etapas en un proceso de descongelamiento.** Para llevar a cabo un buen descongelamiento ya sea por gas caliente o resistencia eléctrica es indispensable tener una metodología en el proceso de descongelamiento para así llegar a obtener una efectividad en la fusión de la escarcha sin presentar daños en los componentes.

Figura 3. Etapas de un sistema de refrigeración que requiera descongelamiento



Fuente: Autores

**2.2.1.1. Encendido de Compresor y Válvula solenoide línea de líquido.** Cuando inicia el ciclo de refrigeración estos componentes encienden al mismo tiempo permitiendo el paso de refrigerante al evaporador para comenzar refrigerando la cámara de congelación.

**2.2.1.2. Retardo del ventilador.** Tiene como objetivo retardar el encendido del ventilador del evaporador por temperatura alta en la cámara de congelación cuando inicia el ciclo de refrigeración. Ayuda a evitar enviar aire caliente a la cámara cuando ocurre parada del sistema ya sea por descongelamiento o por puesta en marcha. Es un valioso recurso cuando, por ejemplo, es puesto en operación un equipo frigorífico que ha estado parado durante días.

**2.2.1.3. Apagado compresor, ventilador y válvula solenoide línea de líquido.** Cuando se llega a la temperatura o tiempo deseado para inicio de descongelamiento (escarcha en el evaporador) estos dispositivos se apagan para impedir el paso de refrigerante y permitir que se active el dispositivo de descongelamiento. Si estos dispositivos no se apagan e inicia el descongelamiento puede causar la mezcla de vapores y líquidos calientes y fríos los cuales generan colapsos de vapor que generan ondas de choque.

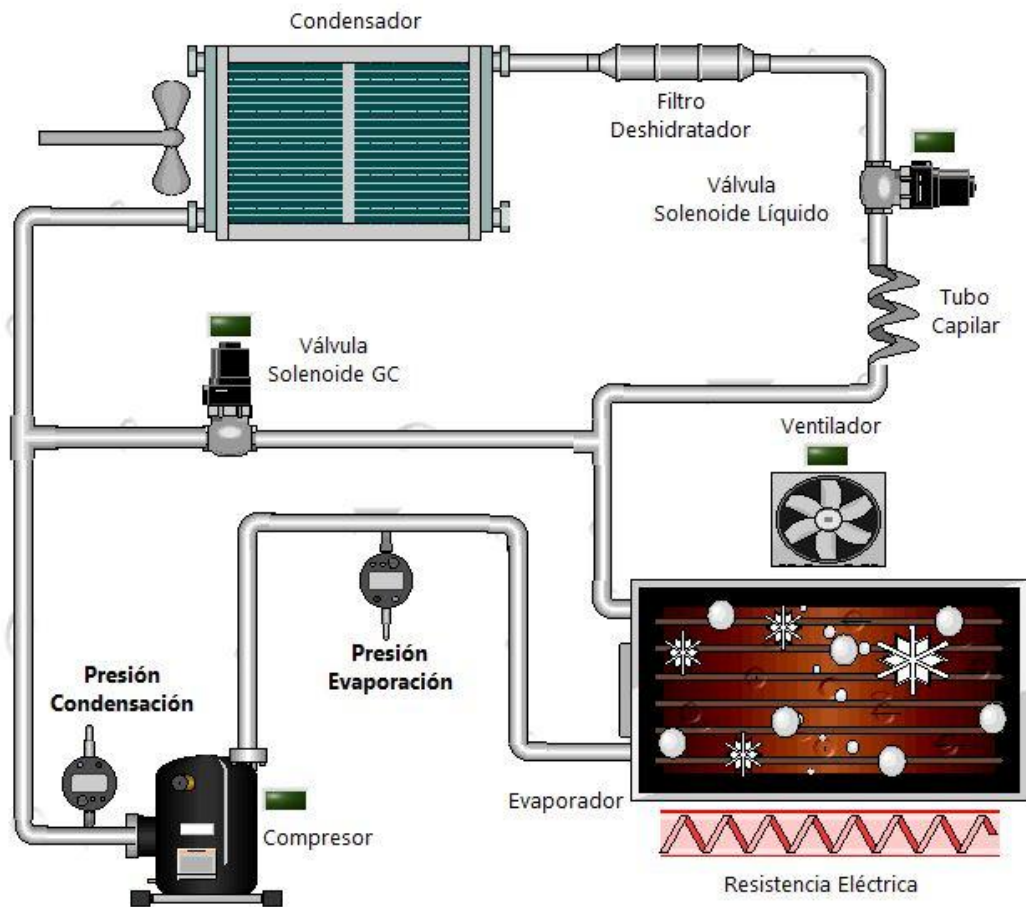
**2.2.1.4. Energizar dispositivos de descongelamiento.** Para dar inicio al descongelamiento se requiere energizar algún dispositivo para dar fusión de la escarcha ya sea por gas caliente o por resistencia eléctrica. Esta etapa arranca siempre y cuando este apagado ventilador, válvula solenoide líquido y compresor. Este último solo permanece encendido en gas caliente.

**2.2.1.5. Tiempo de goteo.** Al finalizar el descongelamiento por temperatura o por tiempo, es prudente dejar por un tiempo des energizado todos los componentes del sistema mientras en el evaporador ocurre caída de gotas sobre la bandeja de drenaje. Este paso es primordial para que al momento de iniciar el ciclo de refrigeración estas gotas retenidas en el evaporador no se formen como hielo acelerando el proceso de escarchado.

Cabe resaltar que estas etapas se modifican un poco según el método de descongelamiento.

**2.2.2 Descongelamiento por resistencia eléctrica.** Es un sistema cómodo, fácil de instalar y relativamente sencillo de regular y controlar, por lo que puede decirse que es el más generalizado en sistemas de baja potencia. Un juego de resistencias eléctricas acopladas en el evaporador, en íntimo contacto con las aletas, se encargará llegado el momento, de calentar el evaporador hasta fundir totalmente la escarcha por transferencia de calor por conducción<sup>3</sup>.

Figura 4. Esquema del descongelamiento eléctrico



Fuente: Autores

<sup>3</sup> RAPIN, P. J. Instalaciones Frigoríficas Tomo 2. México: Marcombo, Boixareu editores 1997



El descongelamiento por resistencias es ideal en sistemas de baja potencia ya que el área donde la resistencia hace efecto es mínima pues el evaporador es pequeño. En sistemas que requieren mayor potencia es preferible elegir otra alternativa como solución a la formación de escarcha.

Problemas que pueden presentarse en este método:

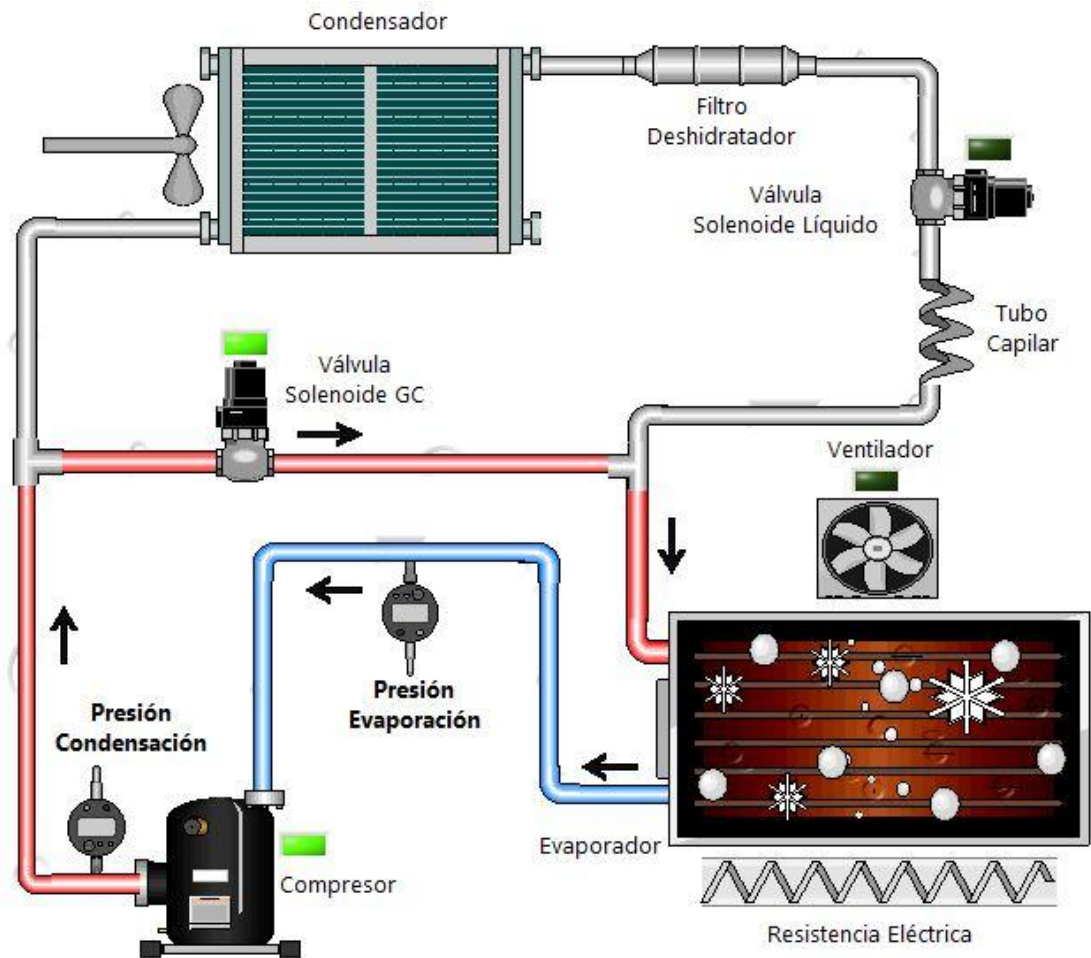
- Calentamiento del refrigerante en fase líquida que pueda existir en el evaporador.
- Peligro de que permanezcan encendidas las resistencias y se funda con el evaporador, debido al aumento excesivo de temperatura.

**2.2.3 Descongelamiento por gas caliente.** El descongelamiento por gas caliente proviene de la descarga del compresor siendo el método más sencillo el que se ilustra en la figura 6. Un Bypass o una derivación equipada con válvula solenoide, se instala entre la descarga del compresor y la entrada evaporador. Cuando la válvula solenoide se abre, el gas caliente de la descarga del compresor deriva del condensador y entra en el evaporador en un punto después de la válvula de expansión o tubo capilar. El descongelamiento se obtiene al ceder el gas caliente al evaporador frío, y condensarse pasando al estado líquido. Parte del refrigerante condensado permanece en el evaporador mientras que el resto regresa al compresor donde es evaporado por el calor del compresor, siendo recirculado al evaporador.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. 10 ed. México: Marcombo, Boixareu editores 1985

Figura 6. Esquema del descongelamiento por gas caliente

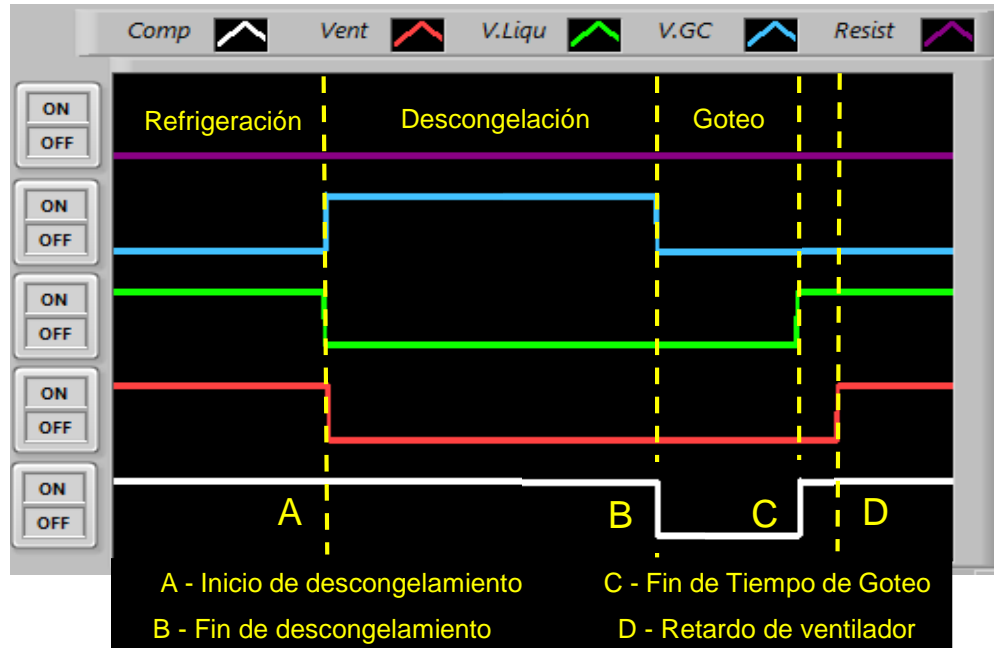


Fuente: Autores

Un inconveniente presentado en este método se debe al gran consumo de energía por parte del compresor, aunque, en relación al tiempo de descongelamiento es eficaz comparado con otros métodos de descongelación. El procedimiento para iniciar la etapa de descongelamiento por gas caliente es:

- I. Cortar la producción de frío en el evaporador, cerrando la válvula solenoide en la línea de líquido.
- II. Activar la válvula solenoide que permite el paso de vapor del compresor al evaporador, para iniciar el proceso de descongelamiento.

Figura 7. Estados de los componentes en la etapa de descongelamiento por gas caliente



Fuente: Autores

Este método tiene ciertas consideraciones importantes:

- Como no hay generación de vapor en el evaporador durante la etapa de descongelamiento, la cantidad de gas caliente disponible en el compresor estará limitada ya que más líquido permanece en el evaporador, con el resultado de que el sistema tiende a quedarse sin suficiente gas caliente para descongelar completamente el evaporador.
- Ocurre la posibilidad de que retorne una cantidad considerable de refrigerante líquido al compresor lo que ocasiona daños en este componente. Esto suele ocurrir al principio de la etapa de descongelamiento o inmediatamente después de terminado esta misma etapa<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> ibid

### **3. DISEÑO DEL BANCO DE EXPERIMENTAL**

Para llevar a cabo diseños en instalaciones frigoríficas o diseños en sistemas de conservación de alimentos, hay que tener en cuenta los parámetros fundamentales de instalación, para así paso a paso lograr un mejor rendimiento en el sistema de refrigeración. Como este proyecto es realizado para una aplicación específica y lo que se desea es observar y estudiar de una forma más práctica los métodos de descongelamiento recalcando: etapas de trabajo, tiempos de servicio y consumo energético, es necesario y por razones económicas, de tamaño y de potencia seleccionar un compresor que a partir de él se seleccionan los elementos del sistema que se adapten adecuadamente y logren un óptimo rendimiento.

#### **3.1. DISEÑO ESTRUCTURAL**

Basado en los tipos de bancos experimentales de la Escuela Ingeniería Mecánica se implementó una mesa amplia movible como base sólida de trabajo para que se pueda observar de manera didáctica los componentes principales del sistema de refrigeración y sus etapas de descongelamiento sin ningún inconveniente.

Al momento de instalar el banco experimental se debe tener en cuenta ciertos factores que pueden afectar el rendimiento del sistema:

- Evitar que la cámara de congelación este localizada donde los rayos solares puedan estar en contacto.
- Permitir que la entrada y salida de aire del ventilador del condensador esté libre de obstáculos para que permita la libre circulación y tenga la capacidad de enfriar el refrigerante con mejor eficiencia.

### 3.1.1. Mesa de Trabajo

Fabricada en madera para poder fijar los componentes del sistema de refrigeración.

Largo: 1.2 [m]

Ancho: 0.6 [m]

Alto: 0.6 [m]

### 3.1.2. Cámara de Congelación

En la construcción de la cámara de congelación lo que se busca es representar un cuarto frío en dimensiones pequeñas con el evaporador asequible para observar la formación de escarcha que se presenta en las aletas. Por ende, se dispuso de un Frigobar con puerta panorámica de vidrio.

Largo: 0.545 [m]

Ancho: 0.42 [m]

Alto: 0.545 [m]

Figura 8. Cámara de congelación empleada en el banco de pruebas.



Fuente: Disponible: <<http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/250880X/Frigobar-Recco-RFR-SR55>>

Para poder evidenciar la presencia de escarcha en el evaporador a través de la puerta, la cámara de congelación consta de un vidrio de 3 [mm] de espesor con 0.4 x 0.3 [ $m^2$ ] de área.

### 3.2. DISEÑO TÉRMICO

**3.2.1. Tipo de instalación.** Para el banco experimental se implementa un sistema típico por compresión de vapor con refrigeración de tipo doméstico ya que el banco solo cuenta con una cámara de congelación y una unidad compresora de caballaje pequeño.

**3.2.2. Situación geográfica de la instalación.** El banco de pruebas está localizado en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander en la ciudad de Bucaramanga-Colombia.

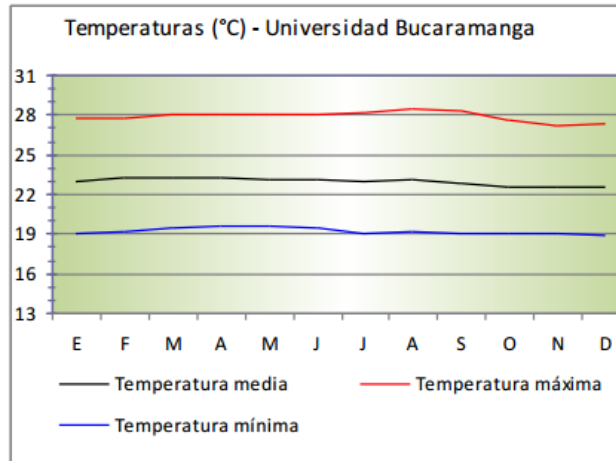
Según con la base de datos del IDEAM<sup>6</sup> la temperatura y humedad relativa varía de acuerdo a la época del año.

Tabla 4. Características climatológicas de la Universidad industrial de Santander – Bucaramanga

Valor de temperatura media anual	22.6 [°C]
Valor de temperatura máxima anual	28.2 [°C]
Valor de temperatura mínima anual	19.8 [°C]
Altitud	1189 [m]
Latitud	7.1°
Humedad Relativa Media	83%

<sup>6</sup> Instituto de hidrología y meteorología y estudios ambientales

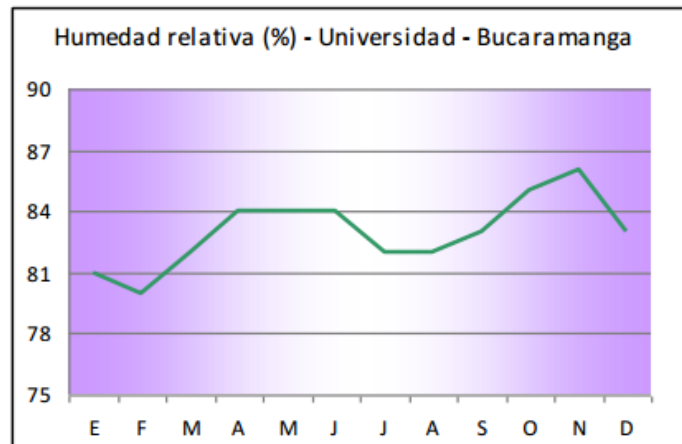
Figura 9. Ficha climatológica de Temperaturas en Universidad Industrial de Santander (IDEAM)



Fuente:

Disponible: <<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>>

Figura 10. Ficha climatológica de Humedad Relativa en la Universidad Industrial de Santander (IDEAM)



Fuente:

Disponible: <<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>>

### 3.2.3. Determinación de las temperaturas

**3.2.3.1. Temperatura Ambiente.** De acuerdo a los datos encontrados por parte del IDEAM se procede a utilizar un valor aproximado de la temperatura ambiente en su punto máximo evitando cualquier error.

$$T_{amb} = 29 [^{\circ}C]$$

**3.2.3.2. Temperatura cámara de congelación.** La temperatura al interior de la cámara de congelación depende del tipo de producto que ha de almacenarse. Como la carga que se aplica a la cámara de refrigeración es agua en temperatura de congelación (hielo), la temperatura oscila en un rango de  $[-8/-10]^7$  °C.

$$T_{camara\ congelacion} = -8^{\circ}C$$

**3.2.3.3. Temperatura de evaporización.** El promedio de la diferencia de temperaturas entre la de ebullición del refrigerante y la que deba obtenerse han sido establecidos de acuerdo con el tipo de evaporador que se maneja. De acuerdo a la configuración del banco de pruebas, el evaporador es de tubo con aletas y de tiro forzado, por ende la diferencia de temperaturas entre la cámara de congelación y la temperatura de ebullición del refrigerante es de  $8^{\circ}C^8$ , entonces:

$$T_{camara\ congelacion} - T_{Evap} = 8^{\circ}C$$

$$T_{Evap} = -16^{\circ}C$$

---

<sup>7</sup> Tomado de ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. Décima edición, capítulo 7, Tabla XVI, p. 269.

<sup>8</sup>. Ibid. capítulo 4, p. 132

**3.2.3.4. Temperatura de condensación.** Al disponer de un condensador enfriado por aire, la práctica establece una temperatura de condensación de 7 u 8 °C por encima de la temperatura del aire a la salida del condensador. Como que dicho aire se calienta de 5 a 7 °C a su paso del condensador, la temperatura de condensación se sitúa, en resumen, alrededor de 15 °C sobre la del aire ambiente a la entrada del condensador,<sup>9</sup> por ende esta ecuación rige la temperatura del condensador:

$$T_{cond} = T_{amb} + 15$$

Conociendo la temperatura ambiente hallada anteriormente, resolvemos:

$$T_{cond} = 29 + 15$$

$$T_{cond} = 44 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

**3.2.4. Cálculo de carga del sistema.** El cálculo de la carga total de una instalación frigorífica pretende hallar la potencia frigorífica necesaria para tratar de mantener la temperatura deseada en la cámara de congelación y así elegir los equipos que conforman el sistema de refrigeración. Al analizar la carga del sistema es necesario tener en cuenta todos los aportes de calor que llegan por los diferentes medios al recinto a enfriar, algunos aportes de calor más comunes son:

- Calor que se filtra al espacio refrigerado, desde el exterior, por conducción. A través de las paredes aisladas.

---

<sup>9</sup> Ibid. capítulo 3, p. 109.

- Calor introducido en los descongelamientos y aire exterior tibio que entra a través de puertas abiertas o rendijas.
- Calor entregado por un producto caliente, al reducir su temperatura al nivel deseado.
- Calor desprendido por cualquier equipo que produzca calor y se encuentre instalado en la cámara, tal como motores eléctricos, luces, etc.

La suma de todos los aportes de calor permite seleccionar la potencia del compresor a una temperatura de evaporización planteada.

**3.2.4.1. Cálculo de carga a través de las paredes.** La carga a través de pared es común ya que siempre se presenta un calor transmitido a través de una superficie de tal espesor. Esta carga lo rige la ecuación de transferencia de calor por conducción

$$Q_{pared} = S * U * \Delta T$$

*Donde:*

$Q_{pared}$  = Cantidad de calor transferida por la pared, en W (Kcal/h).

$S$  = Superficie de la pared, en  $m^2$ .

$U$  = Coeficiente de conductividad termica, en  $W/m^2 K$  (Kcal/h  $m^2$   $^{\circ}C$  ).

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas entre el exterior e interior, en  $^{\circ}C$ .

Para hallar el cálculo a través de pared es indispensable tener claro el área de la cámara de congelación y el material que está compuesto.

#### A. Área cámara de congelación

De acuerdo con la teoría entre mayor superficie, mayor transferencia de calor. Como la superficie de la cámara de congelación está compuesta por poliuretano y en su parte frontal posee un vidrio de 3 [mm] de espesor, se debe hallar dos calores (Calor de pared por el vidrio y Calor de pared por el Poliuretano).

Las dimensiones de la superficie exterior compuesta por poliuretano son:

$$\text{Ancho} = 0.545 [m]$$

$$\text{Alto} = 0.42 [m]$$

$$\text{Profundo} = 0.545 [m]$$

Las dimensiones de la superficie compuesta por vidrio son:

$$\text{Ancho} = 0.32 [m]$$

$$\text{Alto} = 0.41 [m]$$

#### B. Coeficiente de conductividad térmica del material

Cada aislante térmico tiene la capacidad de presentar una resistencia a la propagación del calor y depende del tipo y espesor del material. Como la cámara de congelación posee un espesor de 50 [mm] de poliuretano, su coeficiente de conductividad térmica es de  $U_{poliuretano} = 0.4 \left[ \frac{Kcal}{h} m^2 \text{ } ^\circ C \right]$ <sup>10</sup>. Por otro lado, la parte frontal de la cámara donde se encuentra el vidrio, su coeficiente de conductividad térmica por unidad de longitud es de  $U_{vidrio} = 9 [Kcal/h m^2 \text{ } ^\circ C]$

Estos coeficientes varían en relación con la temperatura y grado de compresión de cada material, por lo que, desde un punto de vista de orden práctico, los valores indicados deben aumentarse alrededor de un 25%<sup>11</sup>, por consiguiente:

---

<sup>10</sup> Tomado de ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. Décima edición, capítulo 7, p. 266.

<sup>11</sup> Ibid.

$$U_{poliuretano} = 0.5 \text{ [Kcal/h m}^2 \text{ °C] ,}$$

$$U_{vidrio} = 11.25 \text{ [Kcal/h m}^2 \text{ °C]}$$

Hay que tener en cuenta un delta entre la temperatura del ambiente y la temperatura de la cámara de congelación. Ya con estos valores es posible hallar el cálculo del calor que se filtra a través de las paredes por conducción tanto para el poliuretano como para el vidrio.

$$\Delta T = T_{amb} - T_{camara\ congelacion}$$

$$\Delta T = 29 - (-8)$$

$$\Delta T = 37 \text{ [°C]}$$

Tabla 5. Calor filtrado a través de pared.

Material	Área (m <sup>2</sup> )	ΔT [°C]	U [ $\frac{Kcal}{h.m^2°C}$ ]	Q [ $\frac{Kcal}{h}$ ]	Q <sub>totalpared</sub> [W]
Poliuretano	1,149	37	0,5	21,3	24,71
Vidrio	0,131	37	11,25	54,52	63,4
Total				75,82	88,11

### 3.2.4.2. Cálculo de pérdidas por servicio de apertura de puertas

La cantidad de calor que entra en la cámara de congelación depende del número de veces que se abran las puertas, dato que, a su vez, está afectado por el uso que se haga del refrigerador. Dicho porcentaje se calcula sobre la cantidad de Kcal/h

por pérdida de paredes, entonces según el libro de Alarcon<sup>12</sup> para una apertura constante de puertas se debe tomar como pérdida por servicio de 25%

$$Q_{Serv} = \%_{servicio} * Q_{Totalpared}$$

$Q_{Serv}$  = Cantidad de calor transferida por cambio de aire, en W (Kcal/h).

$\%_{servicio}$  = Porcentaje de apertura según la aplicación del sistema en 25%

$Q_{Totalpared}$  = Calor perdido por el cálculo de paredes.

$$Q_{Serv} = 0,25 * 88,11$$

$$Q_{Serv} = 22,1[W]$$

**3.2.4.3. Cálculo de pérdidas por servicio de equipos y iluminación en cámara.** En el cálculo de pérdidas por servicio en la cámara de refrigeración se debe tener en cuenta la carga por luces y la carga por equipos eléctricos. En el caso del banco de pruebas posee al interior de la cámara de congelación un motor de corriente alterna que pertenece al ventilador del evaporador. Este motor posee las siguientes características:

- Corriente: 0.2 [A]
- Factor de potencia (PF): 0.6
- voltaje: 110[v]

Teniendo en cuenta que al interior de la cámara no presenta ningún tipo de iluminación, el cálculo de pérdidas por servicio se obtiene solo por la potencia del ventilador

---

<sup>12</sup> Tomado de ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. Décima edición, capítulo 7, p. 267.

$$Q_{motor} = I * V * fp^{13}$$

$Q_{motor}$  = Cantidad de calor transferida por motor del ventilador, en W (Kcal/h).

$I$  = Corriente consumida por motor ventilador, en A(amperios)

$V$  = Voltaje de llegada al banco, en (Voltios).

$fp$  = Factor de potencia del banco.

$$Pot_m = corriente * voltaje * fp$$

$$Pot_m = 0.2 * 110 * 0.6 = 13,2 [W] = 11,35 [Kcal/h]$$

$$Q_{motor} = 13,2 [W]$$

**3.2.4.4. Cálculo de pérdidas por almacenamiento de agua.** El cálculo de carga de almacenamiento de productos, a lo que se hace referencia es a la carga introducida en la cámara, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Cantidad en kilogramos introducidos durante la prueba de 4 horas de trabajo.
- La diferencia de temperatura de la carga que entra y la que se desea obtener
- Calor específico del producto a enfriar.

En las pruebas realizadas se empleó un atomizador de agua el cual fue utilizado para simular una carga en el sistema, con el fin de acelerar la producción de escarcha en las aletas del evaporador. En este caso se tiene los siguientes parámetros:

---

<sup>13</sup> Tomado de: DOSSAT, Roy J. Principios de refrigeración. Décima edición, Capitulo 10, pág 209.

- Carga al sistema: 0,5 [Kg]
- Temperatura de la cámara de congelación -8 [°C]
- Temperatura de agua introducida 23 [°C]
- Punto de congelación 0 [°C]
- Calor específico por encima de la temperatura de congelación  $4,18 \left[ \frac{kJ}{kg} \text{ } ^\circ C \right]$
- Calor específico por debajo de la temperatura de congelación  $4,22 \left[ \frac{kJ}{kg} \text{ } ^\circ C \right]$
- Calor latente de congelación  $333,7 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

Cálculo de carga sensible por encima del punto de congelación

$$Q_{sensible_{sobre\ cero}} = K * Cp_{sobre\ cero} * \Delta T$$

Donde:

$$K = \text{Cantidad de kilogramos almacenados en el sistema por tiempo} \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

$$Cp_{sobre\ cero} = \text{calor específico por encima de cero grados } ^\circ C \left[ \frac{kJ}{kg} \text{ } ^\circ C \right]$$

$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura de entrada} - \text{temperatura de congelacion}(^\circ C)$ .

$$Q_{sensible_{sobre\ cero}} = \frac{0,5[kg]}{3600 * 4[s]} * 4,18 \frac{kJ}{kg} \text{ } ^\circ C * (23^\circ C - 0^\circ C)$$

$$Q_{sensible_{sobre\ cero}} = 3,34[W]$$

**Cálculo de carga sensible por debajo del punto de congelación**

$$Q_{sensible_{bajo\ cero}} = K * Cp_{bajo\ cero} * \Delta T$$

Donde:

$K = \text{Cantidad de kilogramos almacenados en el sistema por tiempo} (Kg/s)$ .

$C_{p_{bajo\ cero}} = \text{calor específico por encima de cero grados } ^\circ C \left( \frac{kJ}{kg} ^\circ C \right)$

$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura de congelacion} - \text{temperatura de camara}(^\circ C).$

$$Q_{sensible_{bajo\ cero}} = \frac{0,5[kg]}{3600[s]} * 4,22 \frac{kJ}{kg} ^\circ C * (0^\circ C - (-8^\circ C))$$
$$Q_{sensible_{bajo\ cero}} = 1,17[W]$$

Cálculo de carga latente

$$Q_{latente} = K * \text{calor latente de congelacion}$$

$$Q_{latente} = \frac{0,5[kg]}{3600 * 4[s]} * 333,7 \frac{kJ}{kg}$$
$$Q_{latente} = 11,6[W]$$

Entonces la carga por almacenamiento de productos es la suma de los calores sensibles y latente empleado en la cámara:

$$Q_{almacenamiento} = Q_{latente} + Q_{sensible\ bajo\ cero} + Q_{sensible_{sobre\ cero}}$$

$$Q_{almacenamiento} = 3,34[W] + 1,17[W] + 11,6[W]$$

$$Q_{almacenamiento} = 16,11[W]$$

**3.2.4.5. Carga total del sistema.** Dado que ya se tienen todas las cargas existentes en el sistema se procede a calcular la capacidad total del sistema

$$Q_{total} = \text{perdidas por paredes} + \text{perdidas por servicio apertura de puertas} +$$
$$\text{perdidas por motor ventilado} + \text{perdidas por carga de almacenamiento}$$

Tabla 6. Carga total del sistema

Cargas	Valor [W]
$Q_{paredes}$	88,11
$Q_{ca}$	22,1
$Q_{motor}$	13,2
$Q_{almacenamiento}$	16,11
$Q_{total}$	139,5

Ahora se calcula para las 24 horas, es decir el total de energía en [J] que se debe extraer.

$$Q_{total\ dia} = 139,5 \left[ \frac{J}{s} \right] * 3600[s] * 24$$

$$Q_{total\ dia} = 12,05 \times 10^6 J$$

Finalmente, la carga a extraer se determina para un trabajo máximo del compresor de 20 horas diarias para sistemas que manejen bajas temperaturas y descongelamientos por calores externos.

$$CAP_{sistema} = \frac{12,05 \times 10^6 [J]}{3600[s] * 20}$$

$$CAP_{sistema} = 167 [W] = 569,8 \left[ \frac{btu}{h} \right] = 143,5 \left[ \frac{kcal}{h} \right]$$

### 3.2.5. Cálculos para selección de los elementos de refrigeración

**3.2.5.1. Compresor.** La selección del compresor fue a partir de los cálculos anteriormente especificados, los cuales cumplen con el requerimiento del sistema. La elección de un compresor para un determinado equipamiento de refrigeración de baja presión de succión (LBP), depende principalmente de dos factores:

#### A. Capacidad del sistema

La capacidad a extraer, es la suma de todos los factores a la hora de diseñar un sistema, por lo tanto incluye dimensiones del recinto, servicio a prestar, carga almacenar y todo aquel elemento externo que pueda generar un calor adicional al sistema.

Para cumplir con los requerimientos del sistema, la capacidad del compresor deber ser seleccionado por arriba de la siguiente capacidad:

$$Cap = 569,8 \left[ \frac{btu}{h} \right]$$

#### B. Temperatura de evaporación :

Otro factor que influye en la elección del compresor es la baja de temperatura de evaporación que el sistema requiere, al igual que la temperatura de condensación a la cual trabaja el compresor.

Para el modelo seleccionado, el compresor debe cumplir con las siguientes temperaturas:

$$T_{Evap} = -16^{\circ}C$$

$$T_{Cond} = 44^{\circ}C$$

**3.2.5.2. Evaporador.** La tarea principal del evaporador es enfriar el medio a la temperatura deseada. El evaporador es el dispositivo que absorbe calor en un sistema de refrigeración debido a que la temperatura del serpentín es menor que la temperatura del medio que se está enfriando.

El refrigerante ingresa al serpentín del evaporador en una mezcla aproximadamente de 75% líquido y 25 %vapor.

La capacidad de un evaporador depende de los siguientes factores<sup>14</sup>:

- Superficie del evaporador
- Diferencia de temperaturas entre la de ebullición del refrigerante y la que se desea obtener.
- Coeficiente que varía de acuerdo al tipo de evaporador a emplear, sistema de válvula de expansión, velocidad del movimiento del medio que rodea al evaporador, formación de hielo en su superficie u otros factores más.

Los factores anteriormente mencionados por los cuales depende la capacidad del evaporador, se relacionan por medio de la siguiente ecuación<sup>15</sup>

$$Q_{evaporador} = A_{eva} * (T - t)K$$

*Donde:*

$Q_{evaporador}$  = Capacidad en Frigorias/hora que deben obtenerse.

$A_{eva}$  = Superficie total del evaporador, en m<sup>2</sup>.

$T$  = Temperatura a obtener.

$t$  = Temperatura de evaporización del refrigerante.

---

<sup>14</sup> Tomado de: ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. Décima edición, Capitulo 4, pág 130.

<sup>15</sup> Tomado de: ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. Décima edición, Capitulo 4, pág 132.

$K =$  *coeficiente de transmisión en calorías/hora por metro cuadrado superficie y grado centigrado de diferencia de temperatura.*

Como se quiere visualizar la formación de escarcha, se construye un evaporador formado por un serpentín de tubo y aletas. La superficie  $S$  es la que comprende el tubo en su diámetro exterior más la de las aletas en sus dos caras.

El valor del coeficiente  $K$  puede establecerse de acuerdo con la velocidad del aire en la circulación forzada del evaporador, según la velocidad del ventilador medida mediante un anemómetro es de 2m/s, para lo cual, según la tabla IX del libro de Alarcón<sup>16</sup> sería un coeficiente de transmisión:

$$Q_{evaporador} = A_{eva} * (T - t) * K$$

$$K = 15 \left[ \frac{Kcal}{h.m^2.°C} \right] \text{ (coeficiente de transmisión )}$$

$$T = -8°C \text{ (temperatura a obtener )}$$

$$t = -16°C \text{ (temperatura de evaporización del refrigerante)}$$

$$Q_{evaporador} = 143,5 \left[ \frac{Kcal}{h} \right]$$

$$A_{eva} = \frac{Q_{evaporador}}{(T - t) * K}$$

$$A_{eva} = \frac{143,5 \left( \frac{Kcal}{h} \right)}{(-8°C - (-16°C)) * 15 \left[ \frac{Kcal}{h.m^2.°C} \right]}$$

$$A_{eva} = 1,2 [m^2]$$

---

<sup>16</sup> Tomado de: ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. Décima edición, Capítulo 4, pág 133.

**3.2.5.3. Condensador.** El calor total rechazado en el condensador incluye tanto calor absorbido en el evaporador como la energía equivalente del trabajo del compresor. Cualquier sobrecalentamiento absorbido por la succión de aire de los alrededores también forma parte de la carga del condensador. Para el cálculo de la capacidad del condensador se tiene la siguiente formula<sup>17</sup>:

$$Q_{condensador} = CAP_{compresor} * factor\ de\ rechazo(THR)$$

Tabla 7. Factores de rechazo de calor: compresores herméticos de enfriamiento en la succión.

TEMPERATURA EVAPORADOR EN °F	TEMPERATURA DEL CONDENSANTE EN °F					
	90	100	110	120	130	140
-40	1.66	1.73	1.80	2.00		
-30	1.57	1.62	1.68	1.80		
-20	1.49	1.53	1.58	1.65		
-10	1.42	1.46	1.50	1.57	1.64	
0	1.36	1.40	1.44	1.50	1.56	1.62
5	1.33	1.37	1.41	1.46	1.52	1.59
10	1.31	1.34	1.38	1.43	1.49	1.55
15	1.28	1.32	1.35	1.40	1.46	1.52
20	1.26	1.29	1.33	1.37	1.43	1.49
25	1.24	1.27	1.31	1.35	1.40	1.45
30	1.22	1.25	1.28	1.32	1.37	1.42
40	1.18	1.21	1.24	1.27	1.31	1.35
50	1.14	1.17	1.20	1.23	1.26	1.29

Fuente: DOSSAT, Roy J. Principios de refrigeración. Décima edición, Capítulo 14, pág 316

Según el cálculo de temperaturas del sistema se tiene que:

$$Tem_{ev} = -16^{\circ}C = 3,2^{\circ}F$$

$$Tem_{cond} = 44^{\circ}C = 111,2^{\circ}F$$

<sup>17</sup> Tomado de: DOSSAT, Roy J. Principios de refrigeración. Décima edición, Capítulo 14, pág 316.

De acuerdo a estas temperaturas y a la tabla 4 se obtiene un factor de rechazo de

$$THR = 1.42$$

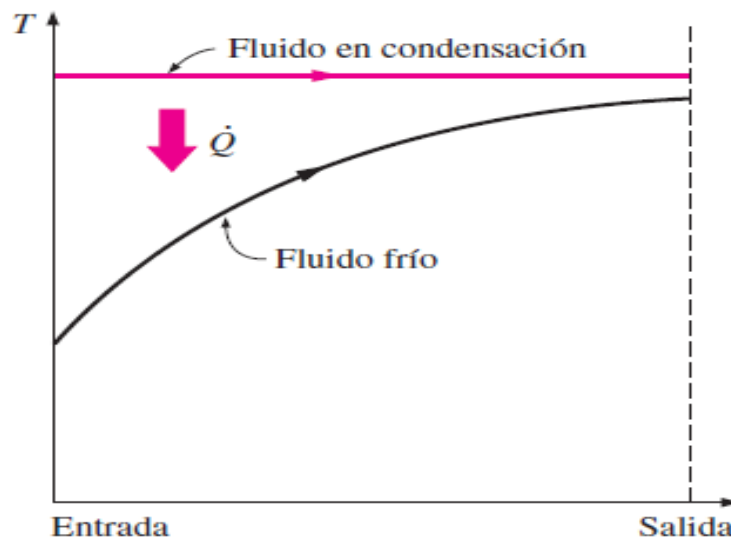
Así mismo, se obtiene una capacidad de compresor de 167 [W], por ende, el calor de carga del condensador es:

$$Q_{condensador} = 167[W] * 1,42$$

$$Q_{condensador} = 237[W]$$

Con el calor total de calor eliminado en el condensador, se procede a calcular el área mínima requerida por el condensador, por medio de la siguiente demostración:

Figura 11. Variación de temperatura del aire cuando se condensa en un intercambiador de calor



Fuente: Cengel. Transferencia de Calor y Masa. 3ª Edición

$$d_Q = U \cdot dA \cdot (T_{con} - T_{aire})$$

$$d_Q = \dot{m}_a \cdot c_{p_a} \cdot dt_a$$

$$\int_{t_{a1}}^{t_{a2}} \frac{-dt_a}{T_{con} - T_{aire}} = \int_0^A \frac{-U dA}{\dot{m}_a \cdot c_{p_a}}$$

$$\ln \left( \frac{T_{cond} - T_{a2}}{T_{cond} - T_{a1}} \right) = \frac{-U \cdot A}{\dot{m}_a \cdot c_{p_a}}; \quad \dot{m}_a \cdot c_{p_a} \left( \frac{T_{a2} - T_{a1}}{T_{cond} - T_{a1}} \right) = \left( 1 - e^{-\frac{UA}{\dot{m}_a \cdot c_{p_a}}} \right) \cdot \dot{m}_a \cdot c_{p_a}$$

$$Q_{cond} = (T_{cond} - T_{a1}) \cdot \left[ \dot{m}_a \cdot c_{p_a} \left( 1 - e^{-\frac{UA}{\dot{m}_a \cdot c_{p_a}}} \right) \right] = k_c * (T_{cond} - T_{a1}) = K_c * DTc$$

Donde:

$T_{a1}$  = temperatura de entrada de aire

$T_{a2}$  = temperatura de salida de aire

$DTc$  = diferencia de temperatura a la entrada del condensador

$K_c = U$  = constante del condensador

Ya que el condensador es enfriado por aire forzado, según la velocidad del ventilador medida mediante un anemómetro es de 1m/s, para lo cual, de acuerdo con la tabla IX del libro de Alarcón<sup>18</sup>. Se asume que los cálculos del condensador son similares al evaporador, como fue demostrado anteriormente

$$Q_{condensador} = A_{cond} * (T_{cond} - t_{a1}) * K$$

$$K = 6 \left[ \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \right] \text{ (coeficiente de transmisión)}$$

$T_{cond} = 44^\circ C$  (temperatura de condensación)

$t_{a1} = 29^\circ C$  (temperatura de entrada de aire al condensador)

$$Q_{condensador} = 203,82 \left( \frac{Kcal}{h} \right)$$

$$A_{cond} = \frac{Q_{condensador}}{(T_{cond} - t_{a1}) * K}$$

<sup>18</sup> Tomado de: ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. Décima edición, Capitulo 4, pág 133.

$$A_{cond} = \frac{203,82 \left( \frac{Kcal}{h} \right)}{(44^{\circ}C - 29^{\circ}C) * 6 \left[ \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C} \right]}$$

$$A_{cond} = 2,3[m^2]$$

**3.2.5.4. Tubo Capilar.** Logra la correcta condensación del refrigerante al ingresar al evaporador reduciendo la presión y temperatura. El tipo de tubo capilar es común en los sistemas de refrigeración de tipo doméstico (baja potencia) además permite la correcta ecualización de presiones en el compresor cuando ocurren paradas ya sea por descongelamientos o por seguridad. Por ejemplo, al momento de puesta en marcha del compresor el tubo capilar permite igualar las presiones de succión y descarga, por lo tanto se puede utilizar un compresor de bajo torque de arranque.

Figura 12 Interfaz para selección del tubo capilar

DanCap™ Version 1.0 Database 1.0

Refrigerant: R134a

Input Data:

- A Heat load of the system: 700 Btu/hr
- B Evaporating temperature: -18 °C
- C Condensing temperature: 44 °C
- D Return gas temperature: 46 °C

Capillary Tube Recommendation

Flow Rate: 19.6 l/min (N<sub>2</sub> at delta p 145 psi)

Length	Inner Diameter
0.33 m	0.70 mm
0.35 m	0.71 mm
0.64 m	0.80 mm
1.15 m	0.90 mm
1.95 m	1.00 mm
3.43 m	1.12 mm
4.84 m	1.20 mm
5.94 m	1.25 mm
10.47 m	1.40 mm

Optimal selection is highlighted in green.

Homepage: compressors.danfoss.com

Help Print Settings

Fuente: Disponible: <<http://refrigerationandairconditioning.danfoss.com/support-center/apps-and-software/dancap/>>

Para la selección del tubo capilar se dispone de un software llamado Dancap otorgado por la página principal de Danfoss, donde a partir del tipo de refrigerante, capacidad del sistema, temperatura de evaporización, temperatura de condensación y temperatura a la salida del compresor ofrece una recomendación para elegir la longitud y diámetro interno del tubo capilar. En la figura 12 se observa la elección del tubo capilar

De esta forma el tubo capilar seleccionado es de una longitud de 2 [m] y un diámetro interior de 1 [mm].

**3.2.3. Selección de los elementos del sistema refrigeración.** Una vez calculada la carga del sistema y la eliminación de calor de los elementos del sistema, se procede a los cálculos de las áreas y tamaños de los componentes. Con el fin de que fuera un banco didáctico, en el cual los estudiantes puedan observar todos los procesos del ciclo de refrigeración por compresión a vapor, se realiza un diseño especial en el cual se disponen todos los componentes en la mesa de trabajo. A continuación describiremos las características de cada elemento seleccionado.

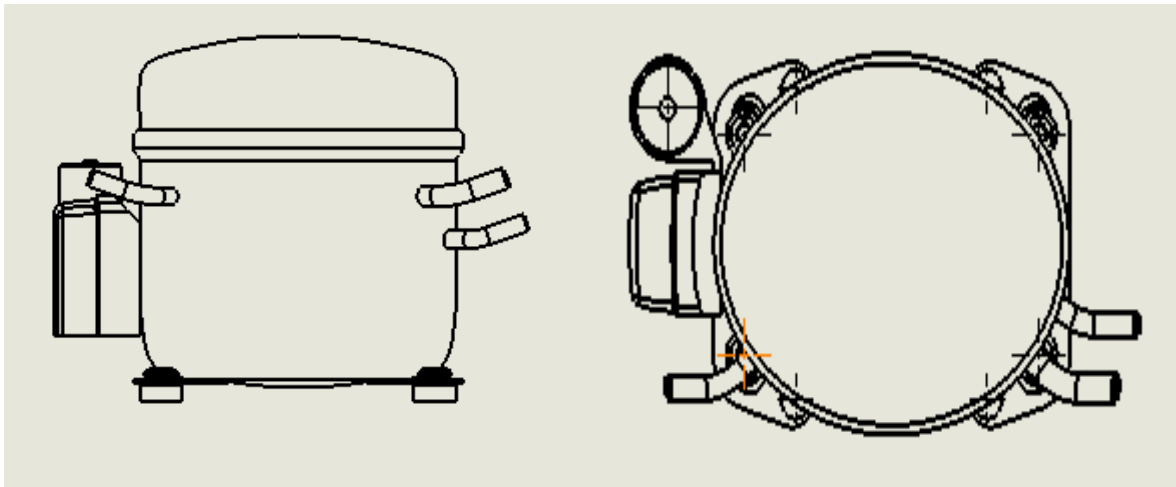
**3.2.3.1. Compresor.** Debido a que anteriormente se calculó la capacidad del sistema, se parte desde el compresor el cual debe cumplir con la extracción de 569,8 [btu/h], entonces siguiendo estos parámetros, el compresor seleccionado es de pequeña potencia.

Para el banco experimental se seleccionó un compresor Mabe C-BZN122L7G de 1/5 [HP]. El cual está por encima de la capacidad calculada, al igual que cumple con las temperaturas de trabajo del compresor. Con esto se garantiza que no haya problemas a la hora de eliminar la carga empleada en el sistema. En la siguiente figura se muestran algunas especificaciones importantes a tener en cuenta del compresor.

Tabla 8. Datasheet compresor Mabe C-BZN122L7G de 1/5 HP

TEST CONDITIONS: @100V50Hz		ASHRAE32 Static			(Condensing temperature 45°C (+113°F))					
Evaporating temperature		Cooling capacity +/- 5%			Power consumption +/- 5%	Current consumption +/- 5%	Gas flow rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
°C	(°F)	[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
-35	(-31)	302	76	89	83	0.93	1.71	3.65	0.92	1.07
-30	(-22)	446	112	131	96	1.06	2.53	4.64	1.17	1.36
-25	(-13)	615	155	180	111	1.21	3.49	5.55	1.40	1.63
-20	(- 4)	812	205	238	126	1.36	4.62	6.44	1.62	1.89
-15	(+ 5)	1040	262	305	142	1.51	5.94	7.33	1.85	2.15
-10	(+14)	1302	328	382	157	1.66	7.46	8.25	2.08	2.42

Figura 13. Compresor Mabe



Fuente: Autores

**3.2.3.2. Condensador** La selección del condensador, se determinó de tubos con aletas con convección de aire forzada la cual cumple con las siguientes características:

- *Diametro:* 0.01[m]
- *dimensiones de aleta:* 0,28[m] \* 0,04[m]
- *Numero de aletas:* 95
- *longitud del serpentín:* 6,82[m]

Tabla 9. Área total del condensador

Área	[m <sup>2</sup> ]
$A_{aletas}$	2,13
$A_{serpentin}$	0,214
$A_{total}$	2,344

Se observa que cumple con el área mínima calculada anteriormente la cual era  $2,3 [m^2]$ , con lo cual se garantiza la adecuada transferencia de calor necesaria en el condensador.

**3.2.3.3. Evaporador.** El evaporador presente en el sistema de refrigeración del banco de pruebas utiliza la circulación forzada de aire como medio eficaz de transferencia de energía; este flujo de aire es inducido a través de un ventilador ubicado próximo al elemento de evaporación y cuyo funcionamiento depende de la operación del sistema.

La selección del evaporador, cumple con las siguientes características:

- *Diametro:*  $0,01[m]$
- *dimensiones de aleta:*  $0,21[m] * 0,06[m]$
- *Numero de aletas:* 50
- *longitud del serpentín:*  $4,2[m]$

Tabla 10. Área total del Evaporador

Área	$[m^2]$
$A_{aletas}$	1,26
$A_{serpentin}$	0,14
$A_{total}$	1,4

Al igual que el condensador, el diseño del evaporador cumple con el área mínima, la cual se calculó anteriormente, la cual según resultados debe ser mayor a  $1.2 [m^2]$

**3.2.3.4. Tubo capilar.** El elemento de expansión que se selecciona al banco de pruebas es el tubo capilar, debido a que la capacidad del sistema es baja. La función principal del tubo capilar es reducir la presión con la cual sale del compresor. Por medio de la interfaz de Danfoss se calculó la longitud y diámetro.

De esta forma el tubo capilar seleccionado es de una longitud de 2 [m] y un diámetro interior de 1 [mm].

Figura 14. Tubo capilar del banco de pruebas



Fuente: Autores

**3.2.3.5. Válvulas solenoide.** La válvula solenoide es el componente que se utiliza más a menudo para controlar el flujo de refrigerante. Esta válvula posee una bobina magnética la cual cuando se energiza levanta el émbolo de su interior. Estas válvulas pueden ser del tipo normalmente cerrado o normalmente abierto. La primera no abre hasta que se energiza y la de tipo normalmente abierto se encuentra en todo momento como su nombre lo indica y no cierra hasta que sea energizada.

Para el funcionamiento del banco de pruebas se utilizan dos válvulas solenoides, una en la línea de líquido, la cual según el funcionamiento del sistema debe ser una válvula solenoide NO (normalmente abierta), la otra se ubica en la derivación de la salida del compresor para el proceso de descongelamiento por medio de gas caliente, en esta línea se debe colocar una válvula solenoide NC (normalmente cerrada), para así evitar el paso de refrigerante en la operación normal del ciclo.

Debido a que las válvulas solenoides NO, son difíciles de encontrar, se decide trabajar con dos válvulas solenoides NC, es por eso que en el proceso de refrigeración siempre debe estar energizada la válvula solenoide de líquido ubicada después del condensador.

Figura 15. Válvulas solenoides del banco de pruebas



Fuente: Autores

La selección de la válvula está dada por las siguientes características:

- Fluido: R134a
- Servicio: línea de líquido y Bypass gas caliente.
- Caída de presión: 30 [bar]
- Temperatura evaporación: -16°C
- Conexión: ¼" tubería de cobre
- Voltaje y frecuencia: 110V y 60Hz
- Tipo válvula NC (normalmente cerrada)

Para este tipo de sistema de refrigeración, las válvulas tipo EV son de las más usadas en los sistemas de compresión de vapor, por lo cual para el sistema diseñado anteriormente se seleccionó la válvula solenoide EV 210B, la cual tiene las siguientes características:

Tabla 11. Especificaciones válvula solenoide Danfoss

<b>CÓDIGO DESCRIPTIVO</b>	<b>BF115CS</b>
<b>PESO</b>	0.297 [kg]
<b>TAMAÑO ACTUADOR</b>	13.5 mm
<b>TEMP. AMBIENTE</b>	-40 - 80 °C
<b>TEMP. AMBIENTE</b>	-40 - 175 °F
<b>HOMOLOGACIÓN</b>	LLC CDC TYSK
<b>CABLE</b>	40,00 in
<b>CABLE</b>	1,00 m
<b>CONEX. BOBINA</b>	CABLE
<b>COLOR</b>	Azul
<b>EAN</b>	5702428024891
<b>FREC.</b>	60 HZ
<b>FORMATO PACK</b>	Multi pack
<b>CONSUMO ENERG.</b>	<b>10,0 W</b>
<b>GRUPO DE PRODUCTO</b>	Solenoid valves
<b>PROD. NAME</b>	Solenoid coil
<b>CANTIDAD/PACK</b>	24 pc
<b>NÚMERO DEL REPUESTO</b>	018F6260
<b>SUPPLY VOLT. AC</b>	115 V

**3.2.3.6. Tipo de refrigerante.** Para obtener una buena refrigeración, desde el punto de vista comercial, todo refrigerante debe reunir en el mayor grado posible las siguientes cualidades<sup>19</sup>:

a) Calor latente de evaporación. El número de calorías a obtener en su ebullición ha de ser muy elevado, a fin de emplear la menor cantidad posible de refrigerante en el proceso de evaporación, para obtener una temperatura determinada.

b) Punto de ebullición. Deberá ser lo suficiente bajo para que sea siempre inferior a la temperatura de los alimentos que se depositen en el refrigerador para su enfriamiento o conservación.

c) Temperatura y presiones de condensación. Habrán de ser bajas para condensar rápidamente a las presiones de trabajo normales y a las temperaturas usuales del medio enfriador que se emplee en el condensador (aire o agua).

d) Volumen específico del refrigerante evaporado. Es el espacio que ocupa el refrigerante en estado de vapor, el cual ha de procurarse sea lo más reducido posible.

e) Temperatura y presión crítica. Todos los refrigerantes tienen un punto en que no condensan, por grande que sea la presión que se les aplique. Esta temperatura se llama punto crítico, y la presión correspondiente a dicha temperatura se llama presión crítica. Por tanto, resulta necesario que dicho punto sea bien alto. En los refrigerantes que se han de mencionar, el punto crítico se halla por encima de las temperaturas normales en refrigeración, por lo que se llaman “permanentes”.

---

<sup>19</sup> Tomado de ARCHILA, Claudia Patricia. Trabajo de grado “Diseño y construcción de un dispositivo de almacenamiento térmico para procesos de alimentos, agroindustriales e industriales. Universidad de la Salle, capítulo 4, p. 78.

- f) Efecto sobre el aceite lubricante. Todos los compresores requieren lubricación, por lo que la naturaleza del refrigerante no ha de afectar seriamente la del aceite empleado, descomponiéndolo.
  
- g) Propiedad de inflamación o explosión. Es muy conveniente que no sean inflamables ni explosivos.
  
- h) Acción sobre los metales. No deben atacar los metales empleados en las diversas piezas de la instalación.
  
- i) Propiedades toxicas. No deben ser, en modo alguno, tóxicos, y, por consiguiente, no han de resultar nocivos para el cuerpo humano.
  
- j) Facilidad de localización en las fugas. Es muy interesante que por su composición resulten de fácil localización en las fugas que se produzcan en el sistema.

Como los parámetros mencionados anteriormente, el refrigerante que cumple con las mayores condiciones es el R134a. El gas refrigerante R134a es un HFC que sustituye al R12 en instalaciones nuevas. Como todos los refrigerantes HFC no daña la capa de ozono. Tiene una gran estabilidad térmica y química, una baja toxicidad y no es inflamable, además de tener una excelente compatibilidad con la mayoría de los materiales.

**3.2.3.7. Filtro Deshidratador.** Este componente absorbe la humedad del refrigerante por medio de gránulos o sustancias secantes que se mantienen dentro de la capsula del filtro entre dos mallas metálicas de orificios muy pequeños destinadas a detener las partículas sólidas e impedir que lleguen al tubo capilar. Para la selección del filtro solo hay que tener en cuenta el refrigerante a utilizar y el diámetro de tubería de la línea de líquido.

Figura 16. Filtro deshidratador hércules ¼ [in]



Fuente: Disponible: < <http://grouponr.com/NR-refrigeracion/product/filtros/filtro-desh-18-10-gr-cpuntas-largas/> >

#### 4. CONTROL DE DESCONGELAMIENTO

Como ya se había comentado anteriormente el banco de pruebas consta con un controlador digital para refrigeración y descongelamiento Full Gauge TC-900e Power el cuál vuelve automático los procesos de deshielo según la necesidad de la instalación.

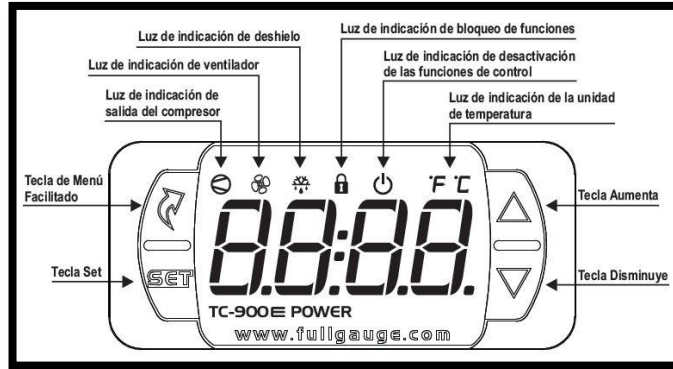
Figura 17. Controlado Full Gauge TC-900e Power



Fuente: Disponible: <<http://www.fullgauge.com/es/productos-tc-900e-power>>

Cuenta con dos sensores de temperatura S1 y S2 que captan las temperaturas de la cámara de congelación y del evaporador respectivamente. El sensor S2 debe quedar fijado al evaporador por una abrazadera con el fin de obtener la temperatura de evaporización exacta buscando un mínimo margen de error. En la figura 18 se observa el controlador en vista frontal donde el usuario puede manualmente manipular el controlador con las teclas de lado derecho e izquierdo según lo que desee ejecutar, además, puede visualmente en la parte superior de la pantalla observar el proceso que se encuentra ejecutando dependiendo del indicador que este encendido.

Figura 18. Indicaciones y teclas controlador

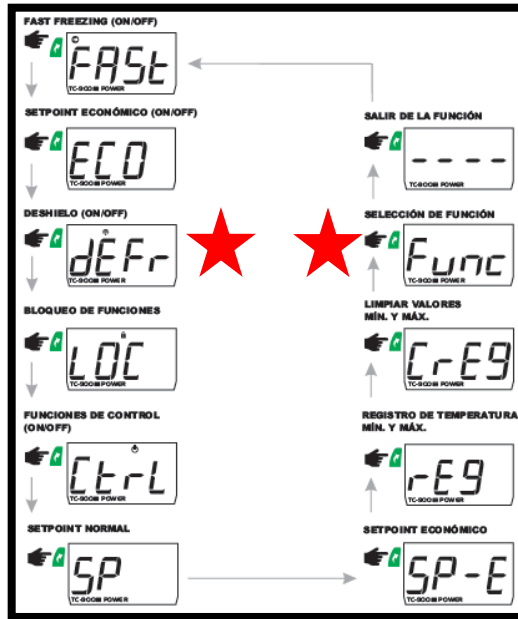


Fuente: Manual de controlador ANEXO A.

#### 4.1. OPERACIONES DEL CONTROLADOR

A partir de la tecla de menú facilitado (toque corto) podemos ingresar y ejecutar algunas de las operaciones presentes en la figura 19.

Figura 19. Operaciones por menú facilitado



Fuente: Manual de controlador ANEXO A

Las operaciones más relevantes al banco de pruebas son:

✓ (FUNC) Selección de funciones: Esta operación ingresa al panel de las funciones del controlador y da la posibilidad de ajustar los parámetros que se requieren para llevar a cabo los descongelamientos. Para alterar los parámetros es indispensable acceder a F01 pulsando la tecla Set. Seguidamente con las teclas de aumentar y disminuir se busca el número 123 y con la tecla Set se acepta la indicación. A partir de ahora se consigue navegar por todo el panel de funciones y alterar los parámetros de cada función. Para salir del panel de funciones y seguir con la operación normal, nuevamente con la tecla Set (toque largo) hasta que aparezca [- - -].

✓ (DEFR) Descongelamiento manual: Esta operación es necesario siempre y cuando se requiera activar o desactivar el descongelamiento manualmente. El descongelamiento manual es realizado por seguridad o simplemente para observar el descongelamiento en cualquier tiempo transcurrido. Por ejemplo, al querer activar DEFR por seguridad es cuando se observa gruesa capa de escarcha en el evaporador y reste tiempo y/o temperatura para su debido control. Si lo que se desea es desactivar DEFR por seguridad es cuando está totalmente fundida la escarcha en el evaporador y reste tiempo para su debido control. La activación o desactivación será indicada a través del mensaje DEFR ON o DEFR OFF respectivamente. Cabe resaltar que esta opción se ejecuta ingresando a DEFR con la tecla de menú facilitado y oprimiendo la tecla Set.

Si el usuario quiere observar en qué etapa del proceso se encuentra, basta con oprimir la tecla Disminuye (toque corto) y será presentada una secuencia indicando:

- ✓ Proceso actual
- ✓ Tiempo transcurrido
- ✓ Temperatura S2 (Sensor ubicado en el evaporador)

Los procesos que se observan en la pantalla al oprimir la tecla Disminuye en toque corto, se representan de la siguiente forma:

- DEL: Retraso en la puesta en marcha del banco
- FAN: Retardo de ventilador
- REFR: Ciclo de refrigeración
- PRE: Descongelamiento previo
- DEFR: Etapa de descongelamiento
- DRAI: Tiempo de goteo

Por ejemplo, el banco de pruebas lleva media hora de conectado y se oprime la tecla disminuye, lo que aparecerá en la pantalla del controlador será REFR (indica que está en refrigeración), 00:25 (representa 25 minutos de trabajo en refrigeración ya que 5 minutos pertenecieron a puesta en marcha del equipo) y -15 °C (temperatura de S2).

**4.1.1. Funciones del Controlador.** El controlador Full Gauge TC-900e Power posee 58 funciones técnicas para un ajuste preciso en las instalaciones frigoríficas que lo requieran. A continuación se dará una explicación de cada uno de los parámetros más importantes para el banco de pruebas.

Tabla 12. Funciones del controlador

Función	Parámetro	Mín.	Máx.	Unid.	Patrón Recomend.
F01	Código de acceso	0	999	-	123
F04	Mínimo Set Point permitido al usuario final	-50	105	°C	-13
F05	Máximo Set Point permitido al usuario final	-50	105	°C	10
F06	Retraso en la puesta en marcha (activación)	0 (No)	30	min.	5
F08	Tiempo de refrigeración	1	999	min.	60
F13	Final de descongelamiento por temperatura	-50	105	°C	-
F14	Tiempo de descongelamiento	0 (No)	90	min.	-
F16	Método de descongelamiento	0	1	-	-
F18	Tiempo de goteo	0 (No)	99	min.	6
F19	Temperatura para retardo de ventilador	-50	105	°C	=F13
F20	Tiempo para retardo de ventilador	0 (No)	30	min.	0 (No)
F23	Tiempo para pre-descongelamiento	0 (No)	999	min.	0 (No)
F39	Método de Control	0	1	-	-
F41	Inicio de descongelamiento por temperatura	-50	105	°C	-21

#### 4.1.2. Descripción de los parámetros

- **F01 - Código de acceso:** Es necesario cuando se desea alterar los parámetros de configuración o alterar la unidad de temperatura. Para sólo observar los parámetros ajustados no es necesario introducir ningún código de acceso.

[123] Permite alterar los parámetros avanzados

[231] Permite elegir la unidad de temperatura Celsius o Fahrenheit

- **F04 - Mínimo Set Point permitido al usuario final:** Tope electrónico cuya finalidad es evitar que por engaño, sean ajustadas temperaturas exageradamente bajas para la cámara de congelación.

**Nota:** Cuando se refiere al mínimo Set Point es a la temperatura más baja que desea en la cámara de congelación. Esto es de gran ayuda para cuartos fríos que no desean mantener los productos por debajo de su punto de congelación. Cuando llega a está temperatura el compresor y válvula solenoide se apaga y no produce descongelamiento.

- **F05 - Máximo Set Point permitido al usuario final:** Tope electrónico cuya finalidad es evitar que por engaño, sean ajustadas temperaturas exageradamente altas para la cámara de congelación.

- **F06 - Retraso en la puesta en marcha (activación):** Cuando el controlador es conectado a la corriente espera el tiempo indicado en esta función y después de este tiempo el sistema enciende. Durante el retraso el controlador indica la temperatura, permaneciendo con todas las salidas desactivadas.

**Nota:** Por seguridad es recomendable mínimo 2 minutos ya que cuando ocurre ida y vuelta de la corriente estos dos minutos le permite al usuario desconectar el controlador y revisar algún tipo de daño.

- **F08 - Tiempo de refrigeración:** Cuando el sistema esté configurado para disponer de control por tiempo (F39=0), este parámetro establece el tiempo máximo de duración del proceso de refrigeración. En este caso será iniciado el descongelamiento siempre que transcurra el tiempo configurado en este parámetro.

- **F13 - Final de descongelamiento por temperatura:** Cuando la temperatura del evaporador es superior o igual al valor configurado en este parámetro, el descongelamiento será finalizado. Dependiendo del método de descongelación se registra la temperatura

**Nota:** Si la temperatura no llega al valor configurado, el descongelamiento es realizado por tiempo según lo establecido en F14 y un punto permanece parpadeando en el ángulo inferior derecho de la pantalla al ocurrir el descongelamiento.

- **F14 - Tiempo de Descongelamiento:** Este parámetro sirve para ajustar el tiempo máximo de duración del proceso de descongelamiento cuando estamos controlando el sistema por tiempo.

- **F16 - Método de descongelamiento:**

[0] Descongelamiento eléctrico (por resistencias).

[1] Descongelamiento por gas caliente.

- **F18 - Tiempo de goteo:** Tiempo necesario para drenar las últimas gotas de agua del evaporador. En este período todas las salidas permanecen desactivadas.

- **F19 - Temperatura para retardo de ventilador:** Tras el tiempo de goteo se inicia la etapa de retardo de ventilador. El compresor es accionado inmediatamente, pues la temperatura en el evaporador está alta, pero el ventilador solamente es accionado después que la temperatura en el evaporador sea inferior al valor ajustado.

**Nota:** Según las consideraciones del montaje (ítem 4.2.1.) En este parámetro se debe digitar la misma temperatura de F13 ya que el retardo de ventilador tras iniciar la refrigeración lo realiza un temporizador externo al controlador.

- **F20 - Tiempo para retardo de ventilador:** El retorno del ventilador tras iniciar la refrigeración ocurrirá al transcurrir el tiempo configurado en este parámetro.

**Nota:** Según las consideraciones del montaje (ítem 4.2.1.) En este parámetro se debe digitar 0 (No) ya que el retardo de ventilador tras iniciar la refrigeración lo realiza un temporizador externo al controlador.

- **F23 - Tiempo pre-descongelamiento:** Es un tiempo para recoger el gas antes de dar inicio el descongelamiento. Al iniciar el descongelamiento el controlador mantendrá durante este tiempo, solamente el ventilador prendido aprovechando la energía residual del gas.

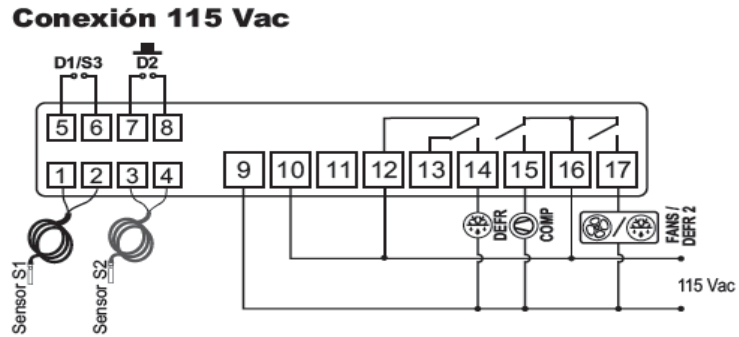
**Nota:** Es indispensable en este parámetro digitar 0 (No) ya que no es necesario realizar el pre-descongelamiento en el sistema de refrigeración.

- **F39 - Método de control:** Define la condición para inicio de descongelamiento  
[0] Tiempo  
[1] Temperatura

- **F41 – Inicio de descongelamiento por temperatura:** Cuando la temperatura del evaporador sea inferior al valor configurado en esta función, el controlador comenzará el descongelamiento.

## 4.2. CONEXIONES ELÉCTRICAS

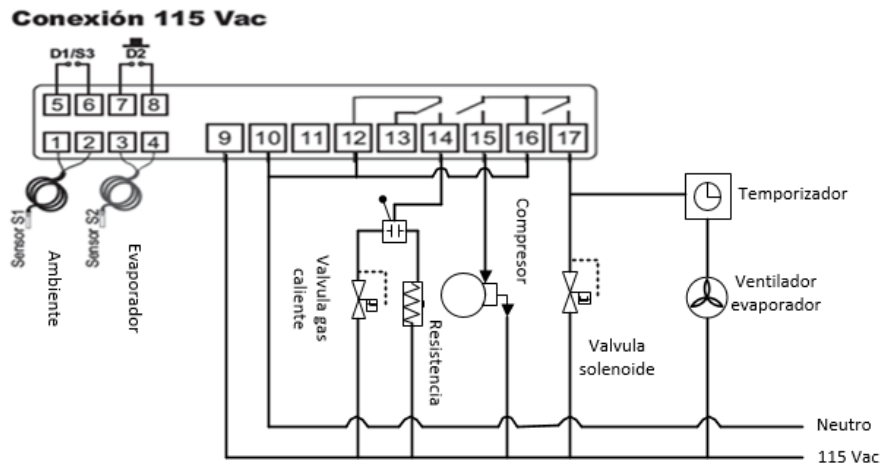
Figura 20 Conexión eléctrica del controlador sin modificar.



Fuente: Manual del Controlador. Anexo A

Como el controlador en sus puertos de salida no posee lo necesario para llevar paso a paso las etapas de descongelamiento, se dispuso del siguiente esquema eléctrico (Figura 14) con algunas modificaciones para lograr abarcar todas las pruebas como se propuso en los objetivos específicos.

Figura 21. Conexión eléctrica del controlador modificado.



#### 4.2.1. Consideraciones al montaje eléctrico

✓ Ya que el controlador tiene un pin de salida de control de ventilador (PIN17) y como la válvula solenoide de líquido no tiene pin de salida, entonces se procede a instalar en el PIN17 la válvula solenoide de líquido pues en la mayoría del tiempo trabaja simultáneamente con el ventilador. Para energizar el ventilador, se conecta en serie un temporizador al PIN17 el cual permite retardo de encendido del ventilador al momento de iniciar el ciclo de refrigeración y así cumplir con las etapas del sistema.

**Nota:** Como el controlador en el PIN17 en su salida no opera el ventilador, hay que deshabilitar todas las funciones destinadas a controlar este mismo (F19=F13) – (F20=0) y (F23=0).

✓ El controlador Full Gauge está diseñado solo para trabajar un tipo de descongelamiento en su conexión, ya sea gas caliente o resistencia eléctrica. Como el banco de pruebas requiere de trabajar gas caliente y resistencia eléctrica por ciclos, se dispone de un switch donde le ayuda al usuario elegir el método de descongelamiento a utilizar.

**Nota:** Al momento de elegir el método de descongelamiento, verificar que la función descrita en el controlador (F16) concuerde con la seleccionada en el switch.

✓ El banco de pruebas está en constante encendido y apagado del compresor debido a las etapas que debe cumplir. Esto es un problema para los compresores ya que después de un prolongado tiempo de trabajo, el arranque del compresor está sobrecalentado y por ende dispara el sensor térmico que no deja energizar el compresor. Para satisfacer el requerimiento fue necesario la instalación tres componentes de arranque que le ayudan al compresor encender sin ningún inconveniente:

- Relay de Compela
- Conector térmico de Compela
- Capacitor de arranque de 150  $\mu$ f

### 4.3. CONTROL POR NECESIDAD

Significa que el controlador está monitoreando la temperatura presente el evaporador. A medida que transcurre el tiempo, la temperatura va disminuyendo debido a la presencia de escarcha en las aletas del evaporador. Si la temperatura de evaporización llega al valor de inicio de descongelamiento (F41), el controlador se encarga de ejecutar el descongelamiento dependiendo del método seleccionado.

**4.3.1. Control por necesidad en gas caliente. Escenario1.** Una característica principal del método de gas caliente es que el compresor en todo momento permanece encendido tanto en refrigeración como en la etapa de descongelamiento, ya cuando se llega a tiempo de goteo es desenergizado.

Tabla 13. Estado de los componentes al iniciar descongelamiento por gas caliente.

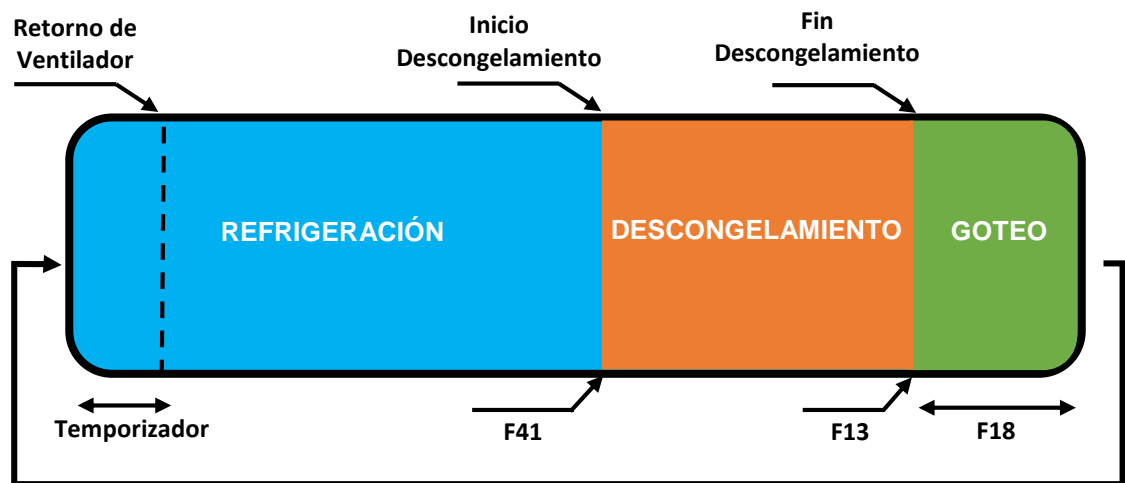
Componentes	Estado
<b>Compresor</b>	Activado
<b>Ventilador Evaporador</b>	Desactivado
<b>Válvula solenoide Líquido</b>	Desactivado
<b>Válvula solenoide gas caliente</b>	Activado
<b>Resistencia eléctrica</b>	No requerido
<b>Sensor de temperatura en el evaporador</b>	Activado

Antes de dar inicio con la metodología de las pruebas, cabe aclarar que el controlador por seguridad realiza el fin de descongelamiento al primer parámetro

que alcance ya sea por tiempo o por temperatura F14 y F41 respectivamente. Debido a esto y para obtener resultados claros en las tomas de datos se debe digitar en el controlador valores altos en el tipo de control que no se está trabajando.

**4.3.1.1. Parámetros de las funciones para realizar escenario 1.** En necesario realizar en el controlador una serie de ajustes en los parámetros de las funciones. Como la puesta en marcha del equipo está por 5 minutos (F06), es un tiempo prudente en el cual el usuario tiene para configurar los parámetros

Figura 22 Etapas de descongelamiento con parámetros cuando es controlado por temperatura F39=1



Fuente: Autores

Tabla 14. Configuración de los parámetros para el descongelamiento por temperatura y gas caliente

Pasos	Función	Parámetro	Patrón Recomend.
1	F01	Código de acceso	123
2	F13	Final de descongelamiento por temperatura	1.5
3	F14	Tiempo de descongelamiento	40
4	F16	Método de descongelamiento	1
5	F18	Tiempo de Goteo	6
6	F19	Temperatura para retardo de ventilador	=F13
7	F20	Tiempo para retardo de ventilador	0 (No)
8	F23	Tiempo para pre descongelamiento	0 (No)
9	F39	Método de Control	1
10	F41	Inicio de descongelamiento por temperatura	-22

El patrón recomendado es un parámetro que el usuario puede disponer para realizar cada prueba. Si desea alterar algún parámetro, es necesario que tenga claro el método de descongelamiento y tipo de control que se va a desarrollar.

#### 4.3.2. Control por necesidad en resistencia eléctrica escenario 2

Tabla 15. Estado de los componentes al iniciar descongelamiento por resistencia eléctrica.

Componentes	Estado
<b>Compresor</b>	Desactivado
<b>Ventilador Evaporador</b>	Desactivado
<b>Válvula solenoide Líquido</b>	Desactivado
<b>Válvula solenoide gas caliente</b>	No requerido
<b>Resistencia eléctrica</b>	Activado
<b>Sensor de temperatura en el evaporador</b>	Activado

#### 4.3.2.1. Parámetros de las funciones para realizar escenario 2

Tabla 16. Configuración de los parámetros para el descongelamiento por temperatura y resistencia eléctrica.

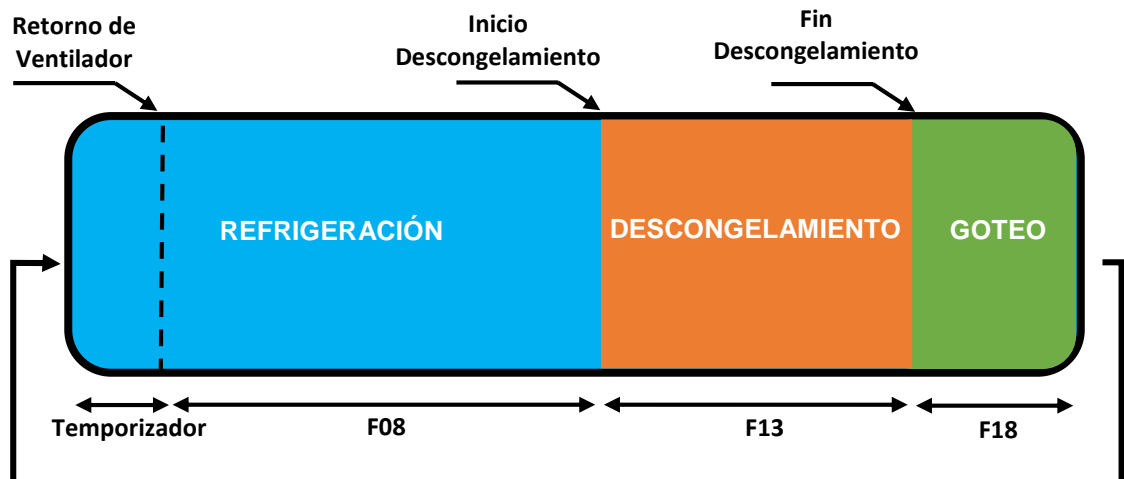
Pasos	Función	Parámetro	Patrón Recomend.
1	F01	Código de acceso	123
2	F13	Final de descongelamiento por temperatura	1
3	F14	Tiempo de descongelamiento	40
4	F16	Método de descongelamiento	0
5	F18	Tiempo de Goteo	6
6	F19	Temperatura para retardo de ventilador	=F13
7	F20	Tiempo para retardo de ventilador	0 (No)
8	F23	Tiempo para pre descongelamiento	0 (No)
9	F39	Método de Control	1
10	F41	Inicio de descongelamiento por temperatura	-22

#### 4.4. CONTROL POR TIEMPO

Para elegir los tiempos de refrigeración y de descongelamiento adecuados fue necesario realizar minuciosas pruebas antes de la toma de datos final logrando ajustar los valores según el requerimiento de crear o eliminar escarcha respectivamente. Significa entonces que el controlador actuara según los tiempos programados en los parámetros que se ajustaran a continuación. De esta forma se llega a la conclusión de que para crear una excelente capa de escarcha en el evaporador es necesario disponer de un tiempo de refrigeración de una hora, así mismo, para eliminar la mínima escarcha presente en el evaporador depende del método de descongelamiento a implementar.

**4.4.1. Control por tiempo en gas caliente escenario 3.** El tiempo de descongelamiento cuando es implementado gas caliente es de 7 minutos para trabajos de refrigeración alrededor de 1 hora. El descongelamiento comienza por la tubería del evaporador y a medida que transcurre el tiempo se prolonga hasta la tubería.

Figura 23 Etapas de descongelamiento con parámetros cuando es controlado por tiempo F39=0



Fuente: Autores

#### 4.4.1.1. Parámetros de funciones para realizar escenario 3

Tabla 17. Configuración de los parámetros para el descongelamiento por tiempo y gas caliente.

Pasos	Función	Parámetro	Patrón Recomend.
1	F01	Código de acceso	123
2	F08	Tiempo de Refrigeración	60
3	F13	Final de descongelamiento por temperatura	40
4	F14	Tiempo de descongelamiento	8
5	F16	Método de descongelamiento	1
6	F18	Tiempo de Goteo	6
7	F19	Temperatura para retardo de ventilador	=F13
8	F20	Tiempo para retardo de ventilador	0 (No)
9	F23	Tiempo para pre descongelamiento	0 (No)
10	F39	Método de Control	0

**4.4.2. Control por tiempo en resistencia eléctrica escenario 4.** El tiempo de descongelamiento cuando es implementado resistencia eléctrica es alrededor de 14 minutos para trabajos de refrigeración alrededor de 1 hora. Si el sistema trabaja en refrigeración menos de este valor se puede disponer de un tiempo de descongelamiento menor. El descongelamiento comienza por las aletas del evaporador y a medida que transcurre el tiempo se prolonga hasta la tubería.

#### 4.4.2.1. Parámetros de las funciones para realizar escenario 4

Tabla 18. Configuración de los parámetros para el descongelamiento por tiempo y resistencia eléctrica

Pasos	Función	Parámetro	Patrón Recomend.
1	F01	Código de acceso	123
2	F08	Tiempo de Refrigeración	60
3	F13	Final de descongelamiento por temperatura	40
4	F14	Tiempo de descongelamiento	14
5	F16	Método de descongelamiento	0
6	F18	Tiempo de Goteo	6
7	F19	Temperatura para retardo de ventilador	=F13
8	F20	Tiempo para retardo de ventilador	0 (No)
9	F23	Tiempo para pre descongelamiento	0 (No)
10	F39	Método de Control	0

## **5. INTERFAZ**

La interfaz está diseñada para entrelazar al estudiante al manejo de software LabVIEW de la National Instrument y otorgarle la capacidad no solo de diseñar, simular y controlar sistemas sino también de adquirir todo conocimiento posible y enriquecer su formación académica. LabVIEW es una plataforma y un entorno grafico para diseñar sistemas de medición y control con un lenguaje de programación visual-grafica creado específicamente para ingenieros y científicos que interactúan sus ideas a la realidad donde reduce costos, tiempos en tomas de datos y obtener informaciones con base a datos ficticios. Este software ofrece la integración de cualquier dispositivo hardware que conlleva a un procesamiento de señales ideal para desarrollar una mejor solución.

### **5.1. DISEÑO DE LA INTERFAZ**

En cuanto al diseño de la interfaz está creada y soportada bajo la toolkit Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) el cual es un sistema que tiene mayor interacción Máquina-Humano ya que brinda de manera didáctica asemejar por medio de dibujos los procesos, simulando registro de datos, alarmas y notificaciones que son mostrados a través de la pantalla en el panel de funciones. De una manera más avanzada un sistema SCADA posee un servidor que comunica y administra dispositivos de entrada/salida como PLC, unidades remotas de entrada y salida y dispositivos de adquisición de datos. Estos dispositivos leen datos o mediciones como temperatura, flujo o presión y presenta la información al operador donde se está monitoreando a través del panel.

Puesto que la simulación comprende las etapas de descongelamiento en gas caliente, resistencia eléctrica y descongelamiento natural, también se presentan los estados de los equipos en cada etapa y las gráficas de presión de evaporización y de condensación respecto al tiempo de trabajo. En la figura 24 se observa el panel

frontal de la interfaz en el cual se presenta la mayor información de acuerdo a lo establecido anteriormente. Por otra parte, permite la interacción manual y la comunicación en tiempo real con el usuario dándole la posibilidad de observar, analizar y controlar lo que está ocurriendo.

**5.1.1. Subsistemas de la interfaz.** En el panel de funciones de LabVIEW de la figura 24 la interfaz se encuentra distribuida en 5 secciones las cuales ofrecen al usuario una mayor comodidad para un mejor entendimiento de los sistemas de refrigeración que requieren descongelamiento. Estas secciones son:

A. En esta zona se encuentra los componentes del sistema de refrigeración que por medio de colores e indicadores muestran que está encendido. También posee sensores de temperatura y de presión en la parte de alta y baja presión.

B. Es la columna vertebral de la interfaz. Aquí se debe digitar los parámetros más relevantes para llevar a cabo la simulación de descongelamiento. Los parámetros son:

- Temperatura de inicio de descongelamiento [°C]
- Temperatura de fin de descongelamiento [°C]
- Método de descongelamiento entre los cuales están: gas caliente, resistencia eléctrica y descongelamiento natural.

Así mismo cuenta con un switch de encendido de la interfaz el cual le da el poder al usuario de iniciar con la simulación siempre y cuando se haya digitado los parámetros nombrados anteriormente.

C. El medidor de temperatura de evaporización es el que a través del movimiento llega a la temperatura de referencia de inicio y fin de descongelamiento. Es un

elemento fundamental cuando se requiere simular el descongelamiento de forma manual.

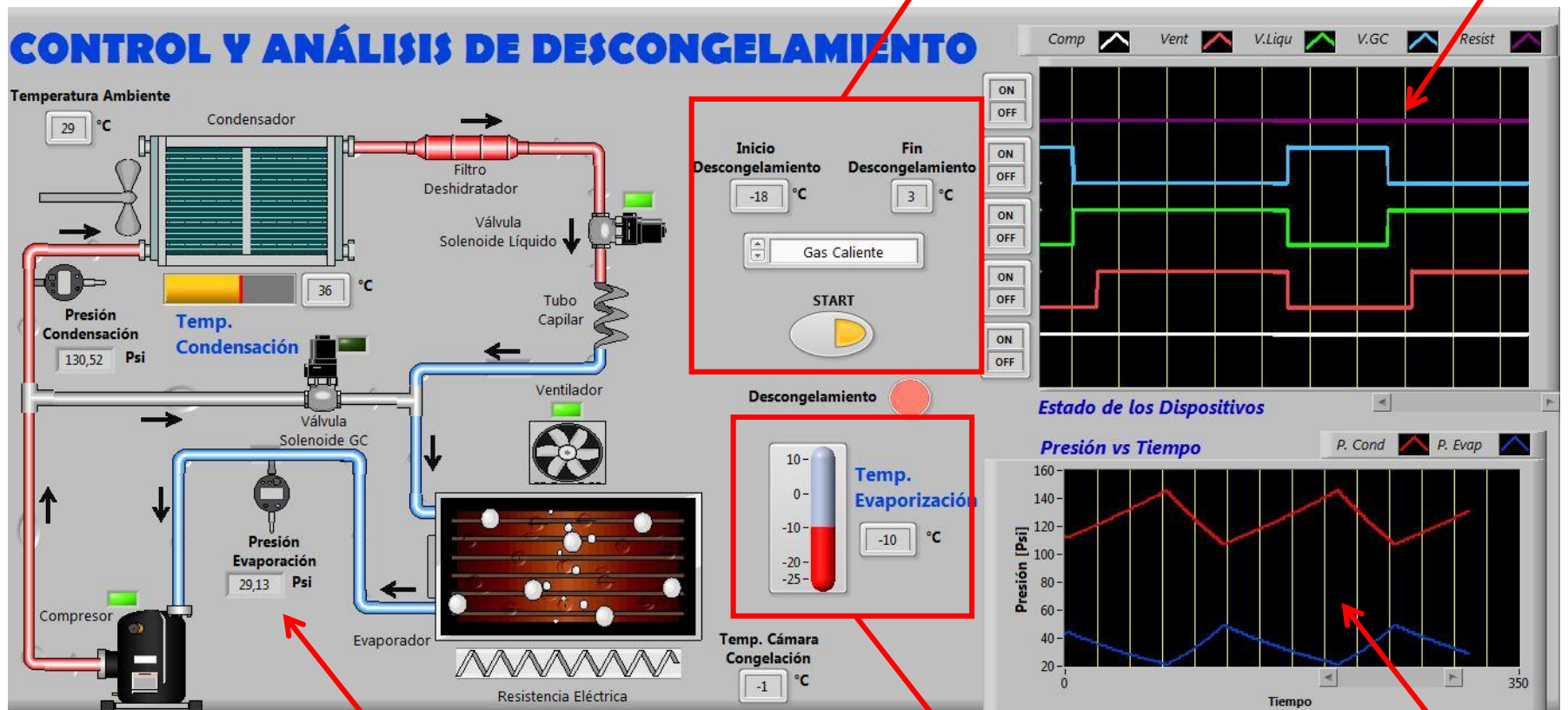
D. Por medio de pulsos indica al usuario que componentes del sistema de refrigeración se encuentran energizados o desenergizados. A medida que transcurre el tiempo se va graficando según la etapa de descongelamiento. Los componentes principales que lleva un continuo control son:

- Compresor
- Ventilador
- Válvula solenoide de líquido
- Válvula solenoide de gas caliente
- Resistencia eléctrica

E. Por medio de las tablas termodinámicas del R134a saturado y con ayuda del software Engineering Equation Solver (EES) se obtiene una regresión polinómica de sexto orden. Para obtener la regresión es necesario digitar la presión que corresponde a cada temperatura y al final dejando la temperatura como variable independiente se obtiene la ecuación. En este caso la presión es esbozada según las temperaturas de evaporización y condensación a través del tiempo. A continuación se presenta la ecuación dada por EES:

$$P = 4.25 * 10 + 1.54 * T + 2.15 * 10^{-2} * T^2 + 1.36 * 10^{-4} * T^3 + 2.08 * 10^{-7} * T^4 - 1.31 * 10^{-9} * T^5 + 2.13 * 10^{-11} * T^6$$

Figura 24. Panel frontal interfaz



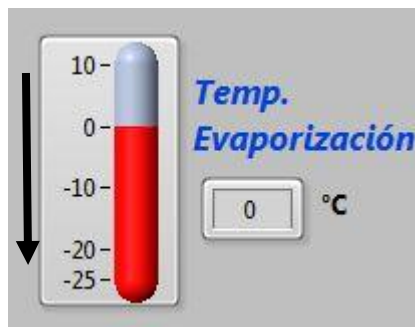
Fuente: Autores

## 5.2. SIMULACIÓN

La interfaz diseñada para este proyecto se encuentra dividida para trabajar en tres casos especiales como simulación manual, simulación automática y simulación por adquisición de datos.

**5.2.1. Simulación manual.** Como ya se había mencionado anteriormente, lo que se desea simular son las etapas de descongelamiento. Por consiguiente en la simulación manual hay que manipular la temperatura de evaporación como se ilustra en la figura 25 para iniciar con las etapas y observar el proceso de descongelamiento, el estado de los equipos y las presiones a través del tiempo. Es por esto que hay que disminuir la temperatura de evaporación hasta donde se indicó el inicio de descongelamiento dado por el usuario. Ya después de llegar hasta la temperatura de referencia, se inicia toda la etapa de descongelamiento y nuevamente el usuario con el cursor debe de comenzar a subir la temperatura hasta el valor de referencia de fin de descongelamiento para así sucesivamente ver los ciclos de trabajo.

Figura 25. Elemento que se debe manipular para llevar a cabo la simulación manual



Fuente: Autores

En el video tutorial dado por el siguiente link<sup>20</sup>, se proporciona una explicación breve de cómo manipular la simulación manual, algunos comentarios acerca de la interfaz y de las etapas de descongelamiento y qué parámetros relevantes son los que se deben digitar al momento de arrancar con el programa. Hay que tener en cuenta que para descargar e instalar el archivo se debe ingresar al siguiente link<sup>21</sup> el cual se encuentra en la web libre de todo tipo de virus y disponible para cualquier persona que desee aprender acerca de los métodos de descongelamiento. Todas las simulaciones cuentan con link de descarga y link de video tutorial para una mayor facilidad.

**5.2.2. Simulación automática.** En este tipo de simulación el usuario tiene muy poca participación con la interfaz ya que el aumento y la disminución de la temperatura la realiza internamente el software permitiendo que el usuario sólo interactúe visualmente. Los tiempos en las etapas del sistema de refrigeración que requiere descongelamiento son reducidos a segundos para acelerar los ciclos de trabajo y observar en pocos minutos como es el trabajo de cada método, lo que no ocurre con la simulación manual debido a que la temperatura y el tiempo está a disposición del usuario.

De igual forma encontramos en la web el link de descarga<sup>22</sup> y el link de video tutorial<sup>23</sup>.

---

<sup>20</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=tlkfgWxbbQE&feature=youtu.be>

<sup>21</sup> <https://mega.nz/#!BwdnyaoA!bTIFfkjvHugLRDPKo3NuJav4KX677ZXkg60VEwOrC1M>

<sup>22</sup> [https://mega.nz/#!cpVj1bgD!42Q2ZLOLOc\\_U6WpON07DZR2cVIKrvpokHpY8N4lqc1g](https://mega.nz/#!cpVj1bgD!42Q2ZLOLOc_U6WpON07DZR2cVIKrvpokHpY8N4lqc1g)

<sup>23</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=BxoVJImXGgs&feature=youtu.be>

**5.2.3. Simulación por adquisición de datos.** Es la simulación más compleja del proyecto ya que requiere de instrumentos que puedan traducir las señales eléctricas generadas por los sensores a valores numéricos los cuales son mostrados en la interfaz y guardados en formato Excel. De este tipo de simulación fue implementado para desarrollar el proyecto y llevar a cabo la adquisición de datos y realizar las gráficas de Presión vs Tiempo para cada escenario de prueba.

**5.2.3.1. Adquisición de datos.** La adquisición de datos corresponde a la medición de las temperaturas por medio de dos termocuplas tipo J ubicadas a la entrada del condensador y del evaporador respectivamente. Estas termocuplas envían datos a través de voltajes del orden de los milivolts los cuales van aumentando a medida que aumenta la temperatura. Las termocuplas están acopladas a un módulo de la National Instrument llamado cRIO-9211 (Módulo de termopares) que permite la entrada hasta de 4 termopares con un rango de temperaturas de -40 a 70°C. En la figura 26 se observa la conexión de una termocupla tipo J al módulo NI cRIO-9211.

Estos dispositivos hardware están disponibles en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la universidad. Para su uso es indispensable la ayuda del auxiliar de la asignatura.

Figura 26. Conexión termocupla tipo J con NI cRIO-9211



Fuente: Autores

Por otra parte es necesario implementar otro dispositivo hardware para enlazar los datos tomados con el software (LabVIEW). Un módulo cRio-9075 de la National Instrument (Chasis de módulos) cumple específicamente con esta función el cual es alimentado por una fuente de energía de 9-30 [V] y por medio de un cable de Ethernet transfiere los datos a la computadora. El chasis de módulos permite adaptar hasta 4 módulos NI-9211 como se ilustra en la figura 27.

Figura 27. Modulo Crio-9075. (Chasis de módulos)



Fuente: Disponible: <<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-354>>

## 6. PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para hacer un análisis comparativo de cada escenario de prueba, se tendrán en cuenta algunos criterios para obtener resultados en igual tipo de condiciones. Cada escenario será realizado dos veces (Prueba 1 - Prueba 2) por 4 horas de ciclos de trabajo continuas.

Hay que tener en cuenta que para acelerar el proceso de la formación de escarcha en el evaporador se procede con la apertura de la puerta de la cámara de congelación cada 5 minutos por 20 segundos permitiendo la entrada de aire caliente y húmedo. En este transcurso de tiempo con un atomizador, rociar agua sobre las aletas del evaporador por 10 segundos simulando un aumento de carga sobre el sistema con el fin de observar en corto tiempo un evaporador con gruesa capa de escarcha y así estudiar el método de descongelamiento dependiendo del tipo de control. La cantidad de agua por cada prueba es de 500 [ml] a temperatura ambiente.

Las variables de medición más importantes del banco experimental las cuales se registran e interpretan para cada prueba son:

- Tiempos de refrigeración y descongelamiento
- Consumo energético
- Presión de evaporización y presión de condensación

Antes de iniciar con los resultados, se da un repaso a los escenarios planteados para la realización cada prueba.

Tabla 19. Escenarios de prueba del banco experimental

	Temperatura	Tiempo
Gas Caliente	Escenario 1	Escenario 3
Resistencia Eléctrica	Escenario 2	Escenario 4

## 6.1. TIEMPOS DE REFRIGERACIÓN Y DESCONGELAMIENTO

Los tiempos de refrigeración, descongelación y goteo varían de acuerdo a la necesidad del equipo frigorífico y cada método y tipo de control. Los métodos de descongelación son implementados según la potencia del sistema de refrigeración, si el sistema posee baja potencia requiere un método de descongelamiento sencillo. Por lo general los sistemas disponen de tiempos de descongelación no muy largos ya que el sistema en este lapso de tiempo no está enfriando lo que ocasiona una disminución de la temperatura ambiente en la cámara de congelación.

El banco experimental cuenta con dos tipos de control, control por tiempo y control por temperatura. Los escenarios 3 y 4 son controlados por tiempo, es decir, los tiempos de refrigeración y descongelamiento son constantes e independientes de la temperatura. Estos tiempos presentados en la tabla 20 fueron tomados de acuerdo a pruebas anteriores para comprobar si son tiempos prudentes para generar y eliminar escarcha en el evaporador.

Tabla 20. Duración de cada etapa en los escenarios 3 y 4

Transcurso del tiempo en cada etapa en escenarios 3 y 4.		
Etapas		Duración [min]
Etapas de Refrigeración		60
Etapas de Descongelación	Gas Caliente	8
	Resistencia eléctrica	13
Goteo		6

Para los escenarios 1 y 2 cuando son controlados por temperatura los tiempos son variantes y dependen de la temperatura ambiente. Si la temperatura del sitio de trabajo se encuentra elevada, toma más tiempo de lo norma llegar el sistema a la

temperatura de referencia para inicio de descongelamiento, en cambio, el proceso de descongelación lo hace en un corto tiempo.

En las tablas 21 y 22 se visualiza la duración en minutos de cada etapa a través de las 4 horas, dividida por los ciclos de operación. Un ciclo de operación consta de refrigeración, descongelación y goteo. En las tablas no se registra la etapa de goteo ya que el tiempo es constante de 6 minutos y es igual si es controlado por tiempo o por temperatura.

Tabla 21. Duración de la etapa por ciclos de operación en prueba 1 del escenario 1

<b>Transcurso de tiempo de cada etapa por ciclos. Primera prueba en Gas Caliente -Temperatura</b>		
<b>Ciclos</b>	<b>Etapa de Refrigeración [min]</b>	<b>Etapa de Descongelación [min]</b>
Primer ciclo de operación	73	12
Segundo ciclo de operación	58	8
Tercer ciclo de operación	67	6
Cuarto ciclo de operación	-	-
<b>Total [min]</b>	198	26

Tabla 22. Duración de la etapa por ciclos de operación en prueba 2 del escenario 1

<b>Transcurso de tiempo de cada etapa por ciclos. Segunda prueba en Gas Caliente -Temperatura</b>		
<b>Ciclos</b>	<b>Etapa de Refrigeración [min]</b>	<b>Etapa de Descongelación [min]</b>
Primer ciclo de operación	98	12
Segundo ciclo de operación	24	9
Tercer ciclo de operación	25	9
Cuarto ciclo de operación	45	-
<b>Total [min]</b>	192	30

Cabe aclarar que el día que se realizó la segunda prueba del escenario 1 era un día nublado y presentaba una temperatura ambiente alrededor de 24 [°C]. Por esta razón los tiempos de refrigeración fueron cortos y los tiempos de descongelación más largos en comparación con la prueba 1.

En las tablas 23 y 24 se observa de igual la duración de cada etapa por ciclo de operación cuando se trabajaba resistencia – temperatura.

Tabla 23. Duración las etapas por ciclos de operación en prueba 1 escenario 2

<b>Transcurso de tiempo de cada etapa por ciclos. Primera prueba en Resistencia -Temperatura</b>		
<b>Ciclos</b>	<b>Etapa de Refrigeración [min]</b>	<b>Etapa de Descongelación [min]</b>
Primer ciclo de operación	82	18
Segundo ciclo de operación	70	16
Tercer ciclo de operación	42	-
Cuarto ciclo de operación	-	-
<b>Total [min]</b>	194	34

Tabla 24. Duración de las etapas por ciclos de operación en prueba 2 del escenario 2

<b>Transcurso de tiempo de cada etapa por ciclos. Segunda prueba en Resistencia -Temperatura</b>		
<b>Ciclos</b>	<b>Etapa de Refrigeración [min]</b>	<b>Etapa de Descongelación [min]</b>
Primer ciclo de operación	59	15
Segundo ciclo de operación	50	16
Tercer ciclo de operación	60	21
Cuarto ciclo de operación	1	-
<b>Total [min]</b>	170	52

En el caso de la primera prueba del escenario 2 se evidencia que solo se presentaron dos etapas de descongelación y esto se debe a que los tiempos de refrigeración fueron prolongados llegando a las 4 horas de trabajo sin poder observar el descongelamiento del tercer ciclo de operación.

A través de las tablas 25 y 26 se muestra la sumatoria de los tiempos por etapa en cada prueba y se registra el promedio de la duración de cada etapa.

Tabla 25. Duración total de cada etapa en escenario 1.

<b>Transcurso del tiempo por etapas en 4 horas. Gas Caliente -Temperatura</b>			
<b>Etapas</b>	<b>Primera Prueba [min]</b>	<b>Segunda Prueba [min]</b>	<b>Promedio [min]</b>
Etapas de Refrigeración	198	192	195
Etapas de Descongelación	26	30	28
Goteo	16	18	17

Tabla 26. Duración total de cada etapa en escenario 2.


<b>Transcurso del tiempo por etapas en 4 horas. Resistencia -Temperatura</b>			
<b>Etapas</b>	<b>Primera Prueba [min]</b>	<b>Segunda Prueba [min]</b>	<b>Promedio [min]</b>
Etapas de Refrigeración	194	170	182
Etapas de Descongelación	34	52	43
Goteo	12	18	15

A partir de la información anterior se puede concluir que cuando el sistema de refrigeración dispone de descongelamiento por gas caliente tiene un menor tiempo en la etapa de deshielo permitiendo que la cámara permanezca con refrigeración la mayor parte del tiempo y evitando que la temperatura ambiente de la cámara aumente levemente en los tiempos de parada.

## 6.2. CONSUMO ENERGETICO DEL SISTEMA

En el transcurso de los ciclos de trabajo de 4 horas se registran datos cada minuto de voltaje, corriente y factor de potencia (PF) para el compresor y de voltaje, corriente, potencia activa para el banco en general. En la figura 28 se observa el modelo en Excel para el registro de datos que se implementó para el proyecto, puede ser encontrado en el anexo E del documento.

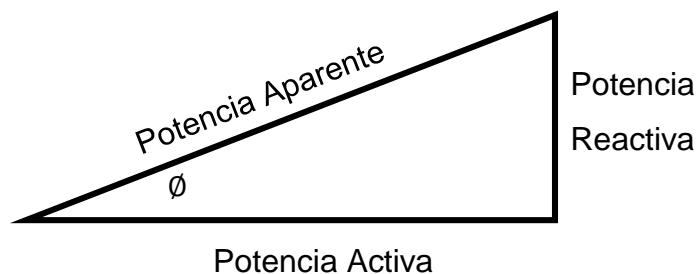
Figura 28. Modelo para el registro de datos

 Universidad Industrial de Santander		ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA							
		LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO						Fecha:	
		DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGETICO BANCO NO FROST						Hora:	
Prueba XX - Sesión 1 ó 2								CONSUMO ENERGETICO TOTAL [KW-h]	
		<span style="color: blue;">■</span> Inicio de refrigeración <span style="color: orange;">■</span> Inicio Descongelamiento <span style="color: green;">■</span> Inicio tiempo de goteo							
Tiempo		COMPRESOR			BANCO TOTAL		POTENCIA COMPRESOR	POTENCIA TOTAL BANCO [KW]	CONSUMO ENERGETICO x min [KW-h]
[min]	[hora]	Voltaje [v]	Corriente [A]	PF	Voltaje [V]	Corriente [A]	[W]		
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
...									

Fuente: Hoja de datos Banco No-Frost. ANEXO C.

**6.2.1. Determinación de la potencia.** La potencia eléctrica define la capacidad que tiene un aparato eléctrico para realizar un trabajo en un determinado tiempo. Sin embargo en instalaciones donde cuentan con equipos inductivos como motores, transformadores y compresores, es decir, equipos que hacen uso del efecto de un campo magnético requieren de un factor de potencia para hallar la potencia útil del sistema (potencia activa) ya que la potencia reactiva es utilizada para la generación del campo magnético que en realidad no produce ningún trabajo. Este factor de potencia es un indicador cualitativo y cuantitativo del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica, por consiguiente es un término que describe la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo y se define por el  $\cos\phi$ .

Figura 29. Triangulo de potencias



Fuente: Autores

El coseno del ángulo que se aprecia entre la potencia activa y aparente se denomina factor de potencia (PF) lo que crea la potencia reactiva. A mayor potencia reactiva, mayor será el ángulo y menos eficiente será al sistema que corresponda. El valor ideal del factor es 1. La potencia total del banco de pruebas se mide a partir de un vatímetro cedido por el laboratorio de Maquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Este instrumento muestra directamente el valor de la potencia activa teniendo en cuenta y registrando el factor de potencia internamente.

Como se había hablado anteriormente, la potencia total del banco se mide cada minuto en cada escenario de prueba. Para realizar la toma de medidas, en la parte trasera del banco con la pinza amperimétrica se amordaza a una fase del cable de alimentación y se toma valor de la corriente evitando abrir el circuito como observa en la figura 30. De igual forma con el mismo instrumento se toma el valor del voltaje. Como la tensión que llega a través de la red de distribución no es constante se dispone de un estabilizador de voltaje para corregir la tensión existente en la línea y evitar:

- Picos y caídas de tensión que ocasionan des energizado de los componentes
- Daños en el compresor y módulos de la National Instrument

Figura 30. Toma de corriente del banco de pruebas con la pinza amperimétrica



Fuente: Autores

A continuación se muestran las gráficas de la potencia total consumida por el banco experimental según los datos registrados en el transcurso de cada prueba. Los datos que proporcionan las gráficas se encuentran en el anexo B del documento.

### 6.2.1.1. Potencia total consumida escenario 1. Gas Caliente - Temperatura

Figura 31. Potencia Total Consumida 1ra Prueba. Gas Caliente – Temperatura

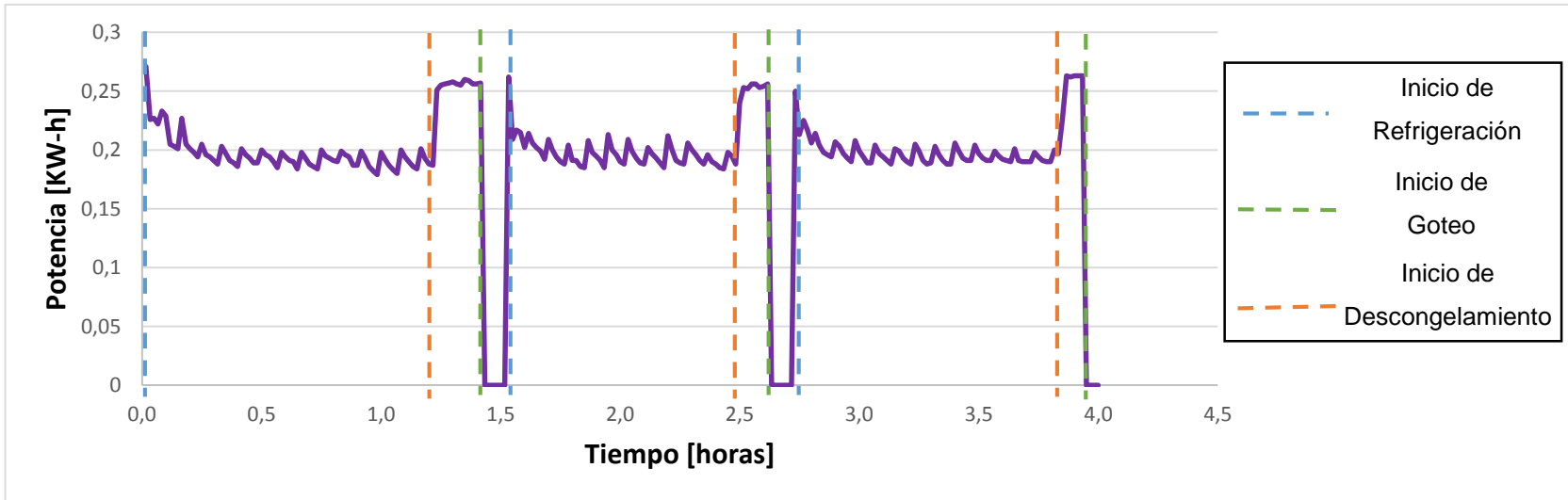
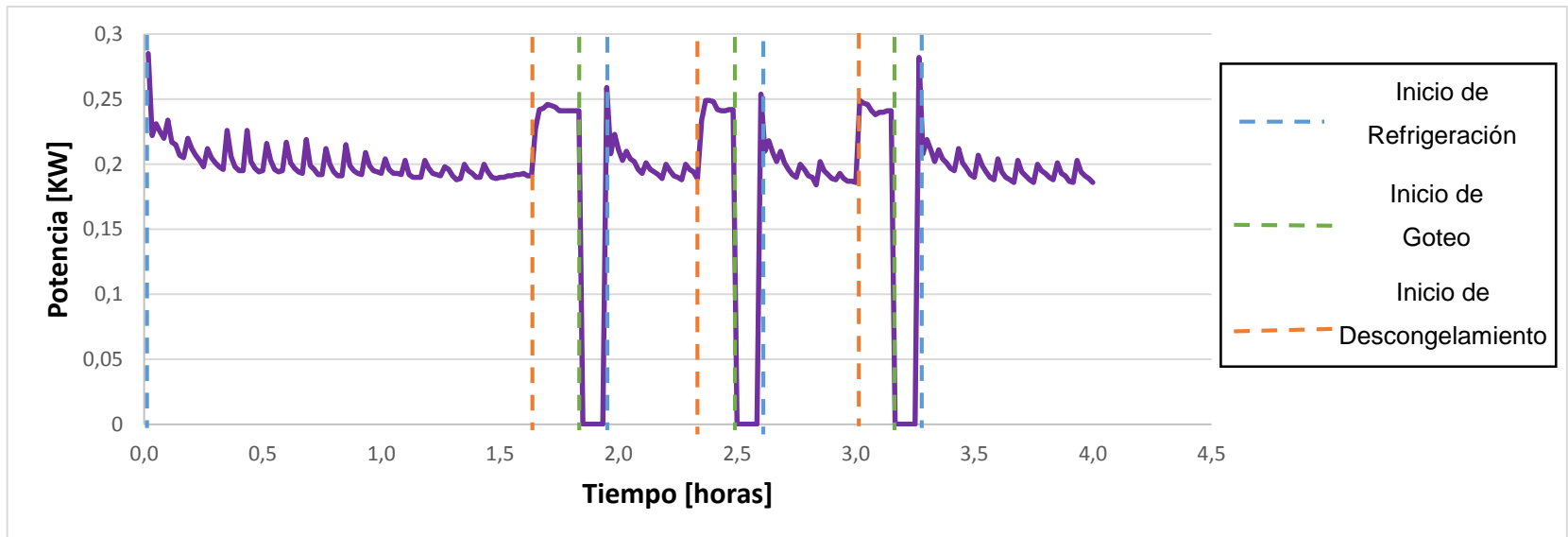


Figura 32. Potencia total Consumida 2da Prueba. Gas Caliente – Temperatura



### 6.2.1.2. Potencia total consumida escenario 2. Resistencia – Temperatura

Figura 33. Potencia total Consumida 1ra Prueba. Resistencia – Temperatura

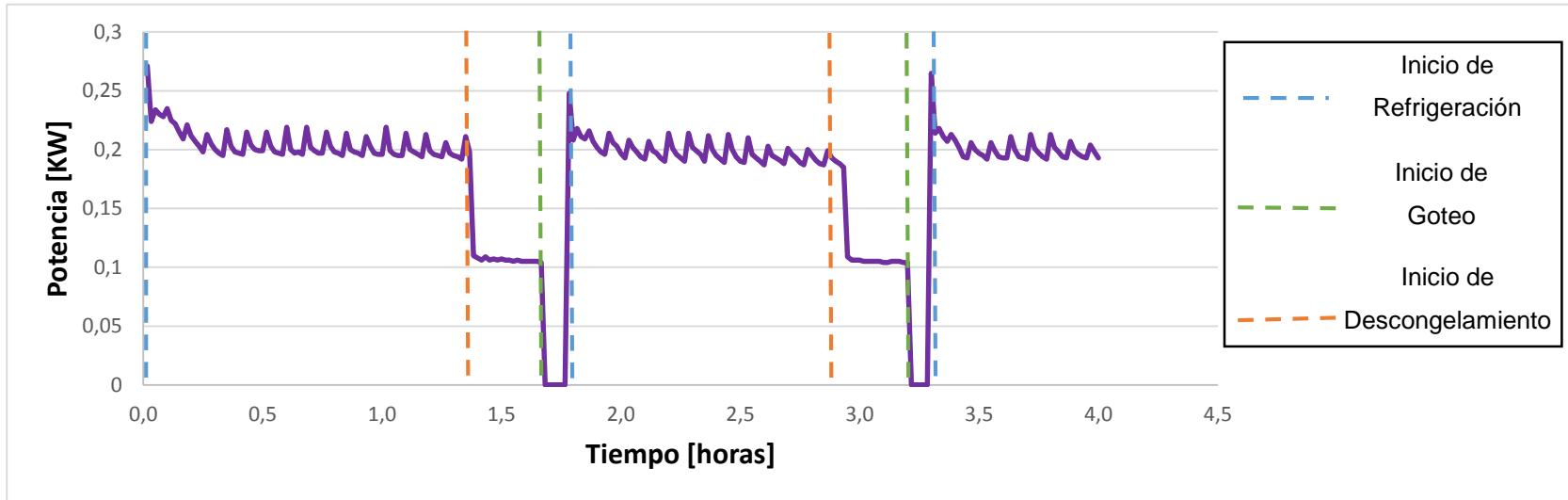
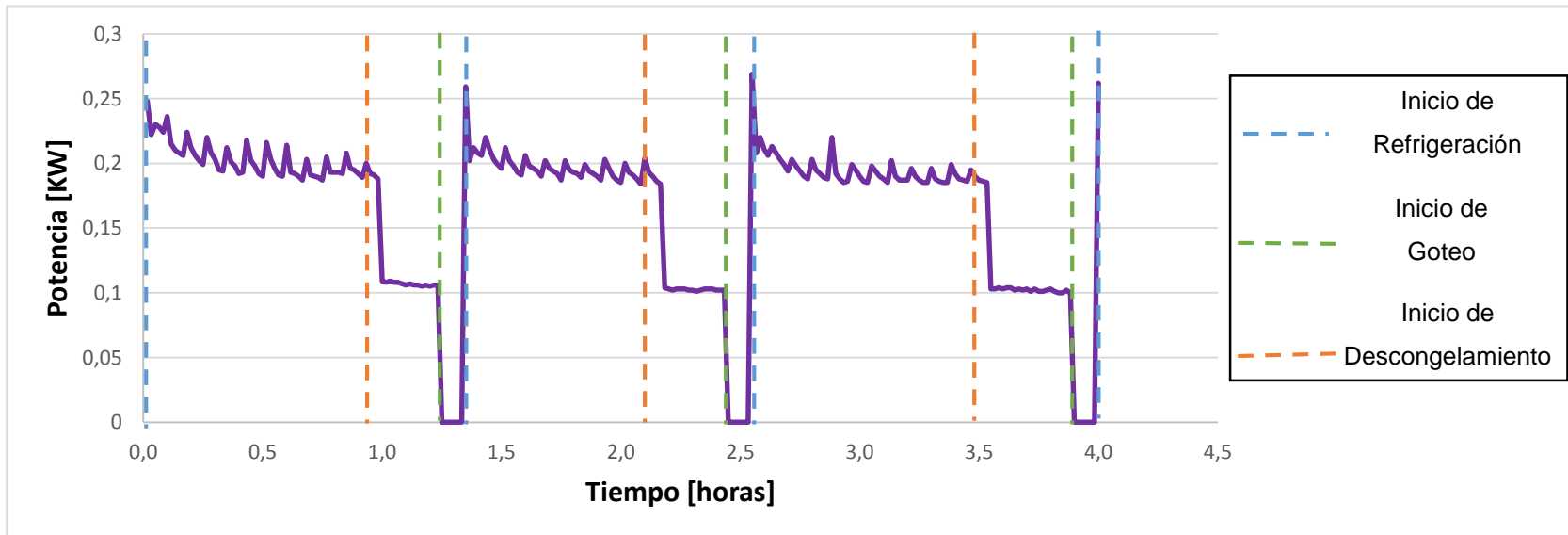


Figura 34. Potencia total Consumida 2da Prueba. Resistencia – Temperatura



### 6.2.1.3. Potencia total consumida escenario 3. Gas caliente – Tiempo

Figura 35. Potencia Total Consumida 1ra Prueba. Gas Caliente – Tiempo

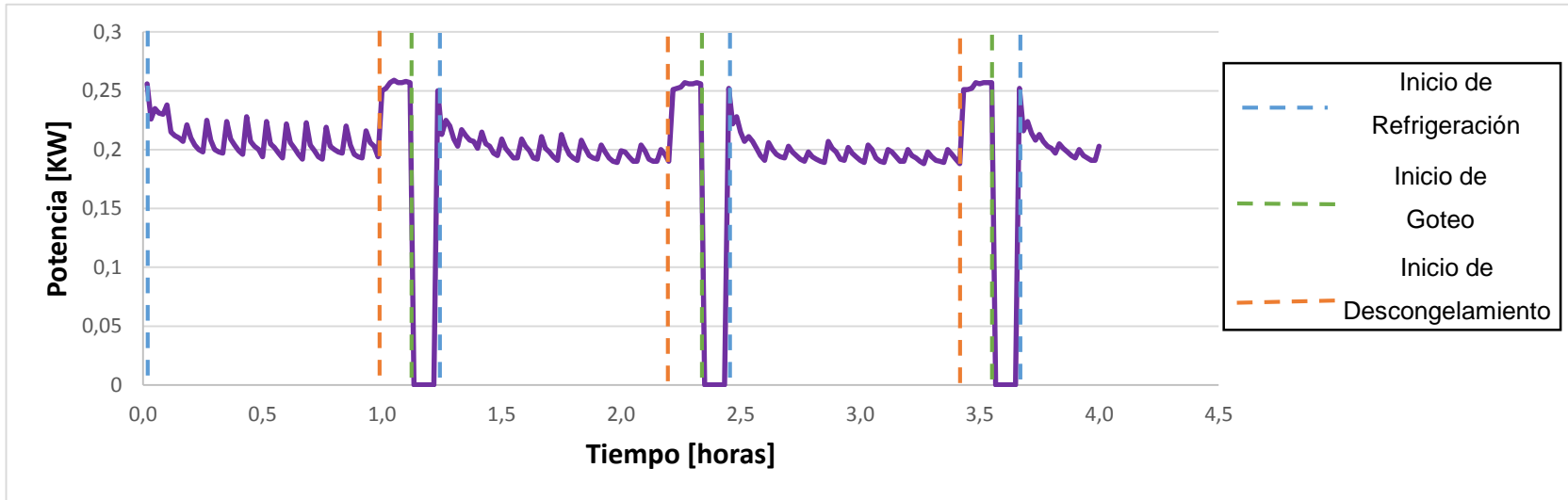
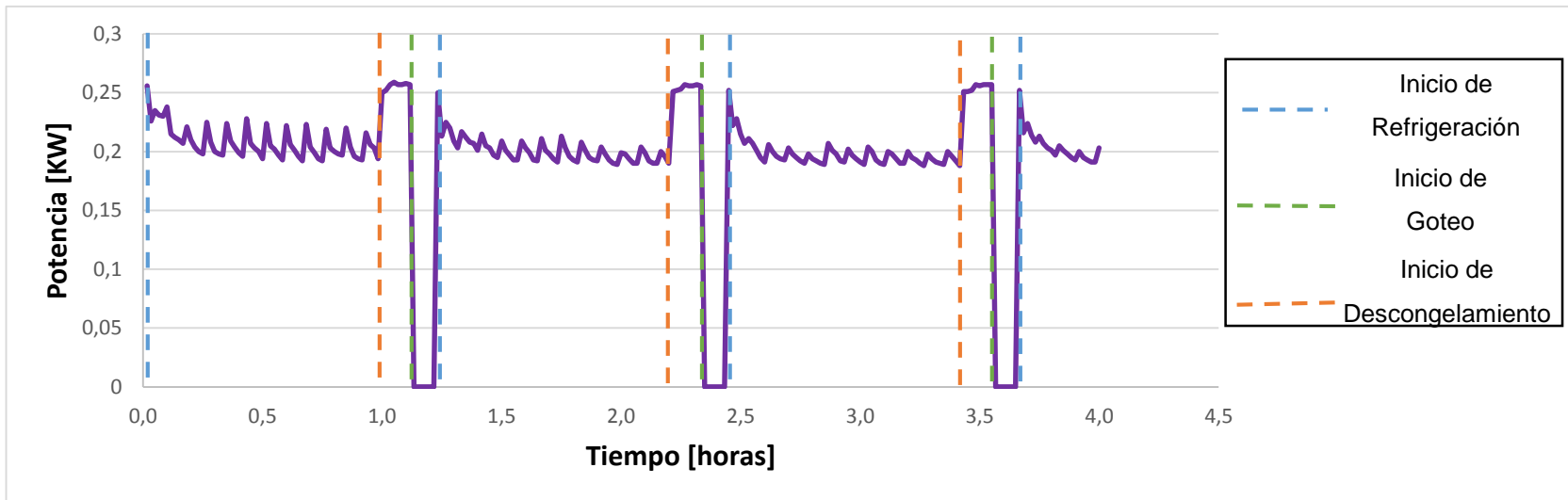


Figura 36. Potencia Total Consumida 2da Prueba. Gas Caliente - Tiempo



#### 6.2.1.4. Potencia total consumida escenario 4. Resistencia – Tiempo

Figura 37. Potencia total Consumida 1ra Prueba. Resistencia – Tiempo

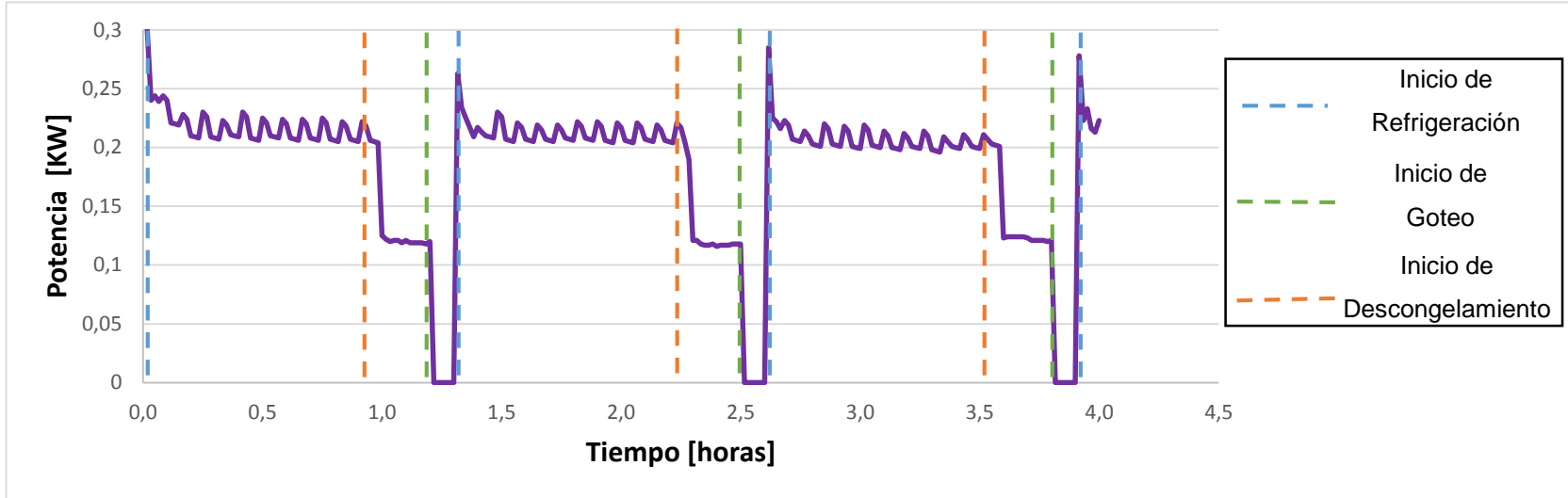
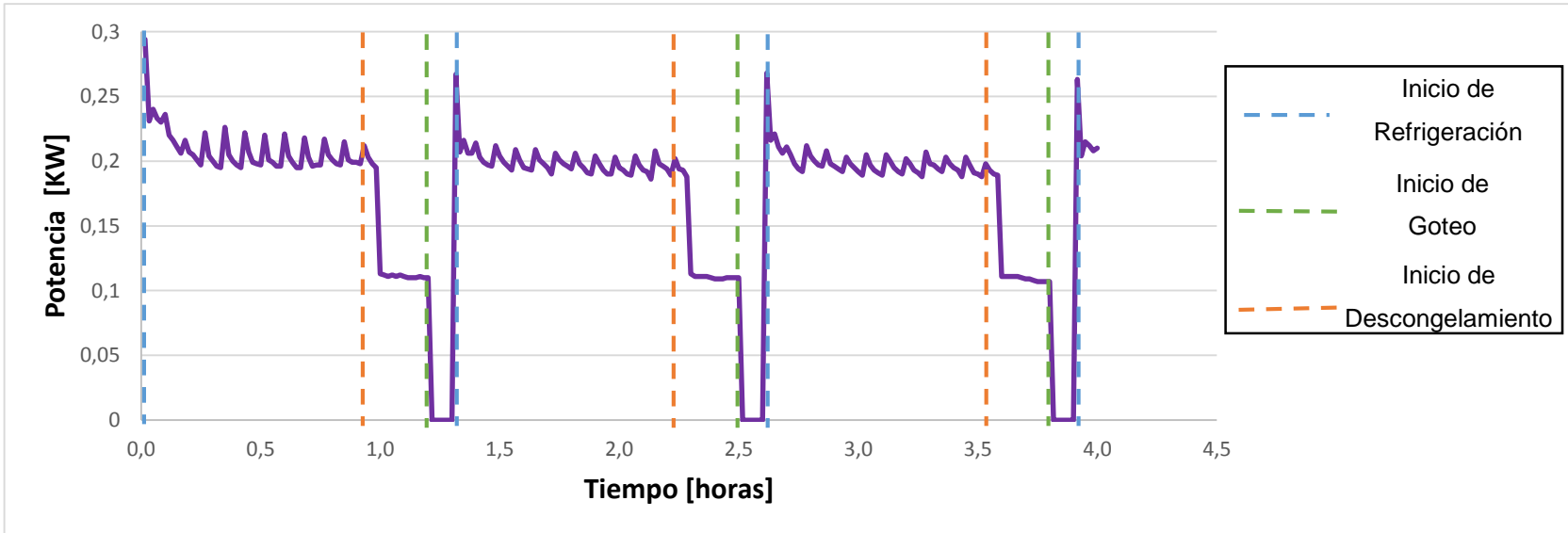
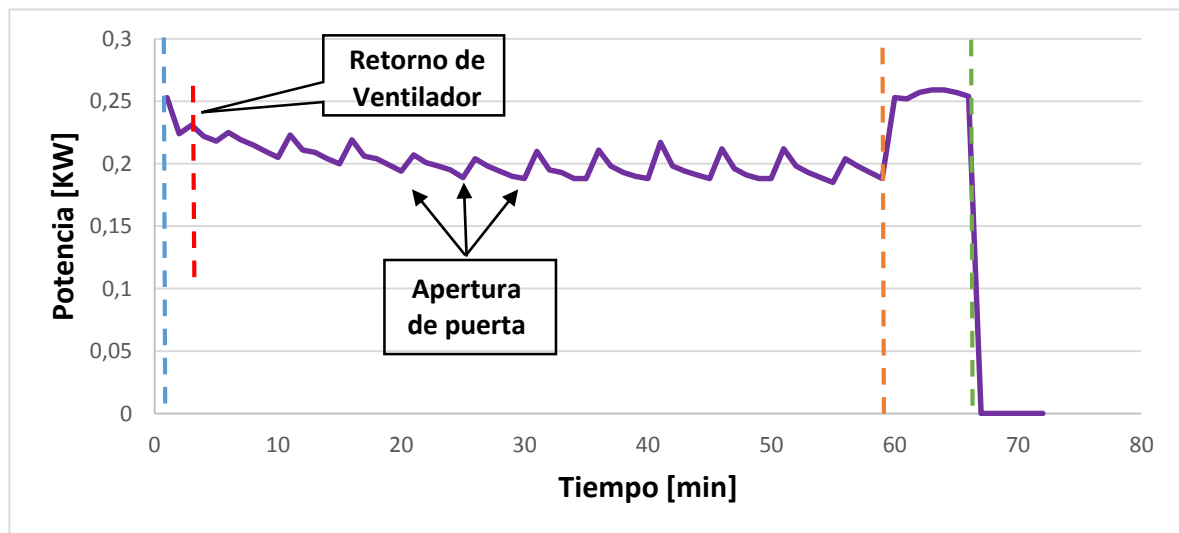


Figura 38. Potencia total Consumida 2da Prueba. Resistencia – Tiempo



Para un análisis detallado se traza una gráfica de sólo un ciclo de operación, para observar como es el comportamiento de la potencia y poder plantear algunas conclusiones y observaciones de acuerdo a las gráficas obtenidas dependiendo de la etapa en que se encuentre:

Figura 39. Potencia total consumida en un ciclo de operación. Gas Caliente - Tiempo



Según la etapa de refrigeración

✓ Se logró evidenciar que la potencia de arranque en el primer intervalo de tiempo (minuto cero – minuto uno) de cada prueba presenta el mayor consumo de potencia durante las 4 horas de trabajo, esto ocurre a que el par (Torque) de arranque debe ser superior al par resistente de la carga. De igual forma sucede al inicio de cada ciclo de refrigeración ya que presenta picos en cada potencia de arranque. A medida que transcurre cada ciclo, la potencia de funcionamiento va disminuyendo, este comportamiento es común en los motores de inducción.

- ✓ Debido a que el retorno del ventilador está a los dos minutos después de cada inicio de refrigeración, se presenta un sutil aumento en la potencia evidenciado en cada prueba.
- ✓ Puesto que la apertura de la puerta e incremento ficticio de la carga es cada cinco minutos, se evidencia un leve incremento de la potencia en este mismo intervalo de tiempo y seguidamente comienza a disminuir. Este proceso se presenta cíclicamente hasta llegar al inicio de descongelamiento.
- ✓ No siempre la menor potencia indica la menor temperatura de evaporización. En algunas ocasiones la potencia total del banco de pruebas es muy baja y aun así no llega a la temperatura de inicio de descongelamiento cuando el tipo de control es la temperatura.

#### Según la etapa de descongelamiento

- ✓ La potencia varía dependiendo del método de descongelamiento de la prueba. Por ejemplo para gas caliente la potencia en la etapa de deshielo aumenta de 0.2 [KW] a 0.25 [KW] mientras que en resistencia eléctrica la potencia disminuye de 0.2 a 0.1 [KW] aproximadamente. Por esta razón el método de descongelamiento por gas caliente genera un mayor consumo de potencia a causa de que en toda la etapa permanece encendido el compresor.

#### Según la etapa de goteo

- ✓ En toda la etapa de goteo, los componentes del sistema permanecen desenergizados por ende la potencia es cero.

Es de aclarar que la potencia es directamente proporcional con el voltaje, a pesar de que al banco experimental se dispuso de un estabilizador de voltaje, en algunas ocasiones los medidores de voltaje registraban 108 [v] y en otras ocasiones hasta 113 [v] generando una diferencia de +/- 5 [V].

**6.2.2. Determinación del consumo de energía.** Para obtener un consumo de energía exacto a cada minuto de encendido del banco es necesario recurrir al método de Simpson ya que es un método de integración numérica para obtener la aproximación de una integral definida en un intervalo de [a,b]. Mediante la regla del trapecio, es decir, que sobre cada subintervalo en el que se divide [a,b], se aproxima la función por polinomios de segundo grado. Seguidamente se calcula la integral como suma de áreas de los trapecios formados en esos subintervalos<sup>24</sup>. A continuación se presenta la ecuación del método de Simpson.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_{\text{tiempo inicial}}^{\text{tiempo final}} \text{Potencia } dt$$

$$\text{Consumo}_{\text{energético}} = \frac{h}{3} \left( f(x_0) + f(x_n) + 4 \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} f_{2i-1} + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}-1} f_{2i} \right)$$

$n = \text{numero total de datos}$

$$h = \frac{b-a}{n}$$

Con base a lo anterior y debido a que el banco de pruebas trabaja por 4 horas, la ecuación que rige el consumo de energía es de la siguiente forma:

$n = 240 \approx \text{Tiempo en minutos de 4 horas de trabajo}$

$$h = \frac{240 - 0}{240} = 1$$

$$\text{Consumo}_{\text{Energético}} = \frac{1}{3} \left( f(t_0) + f(t_{240}) + 4 \sum_{i=1}^{120} f_{2i-1} + 2 \sum_{i=1}^{119} f_{2i} \right)$$

---

<sup>24</sup> Página web: [https://es.wikipedia.org/wiki/Regla\\_de\\_Simpson](https://es.wikipedia.org/wiki/Regla_de_Simpson)

### 6.2.2.1. Consumo energético escenario 1. Gas caliente – Temperatura

Tabla 27. Consumo energético total en 4 horas. Escenario 1

<b>Consumo Energético Gas Caliente -Temperatura</b>			
<b>Etapas</b>	<b>Primera Prueba [KW-h]</b>	<b>Segunda Prueba [KW-h]</b>	<b>Promedio Total [KW-h]</b>
Etapas de Refrigeración	0,644	0,640	
Etapas de Descongelamiento	0,119	0,122	
Goteo	0,000	0,000	
<b>TOTAL</b>	<b>0,763</b>	<b>0,762</b>	<b>0,763</b>

### 6.2.2.2. Consumo energético escenario 2. Resistencia – Temperatura

Tabla 28. Consumo energético total en 4 horas. Escenario 2

<b>Consumo Energético Gas Caliente -Temperatura</b>			
<b>Etapas</b>	<b>Primera Prueba [KW-h]</b>	<b>Segunda Prueba [KW-h]</b>	<b>Promedio Total [KW-h]</b>
Etapas de Refrigeración	0,657	0,565	
Etapas de Descongelamiento	0,063	0,090	
Goteo	0,000	0,000	
<b>TOTAL</b>	<b>0,720</b>	<b>0,655</b>	<b>0,687</b>

### 6.2.2.3. Consumo energético escenario 3. Gas caliente – Tiempo

Tabla 29. Consumo energético total en 4 horas. Escenario 3

Consumo Energético Gas Caliente -Temperatura			
Etapas	Primera Prueba [KW-h]	Segunda Prueba [KW-h]	Promedio Total [KW-h]
Etapas de Refrigeración	0,668	0,661	
Etapas de Descongelamiento	0,105	0,100	
Goteo	0,000	0,000	
<b>TOTAL</b>	<b>0,773</b>	<b>0,761</b>	<b>0,767</b>

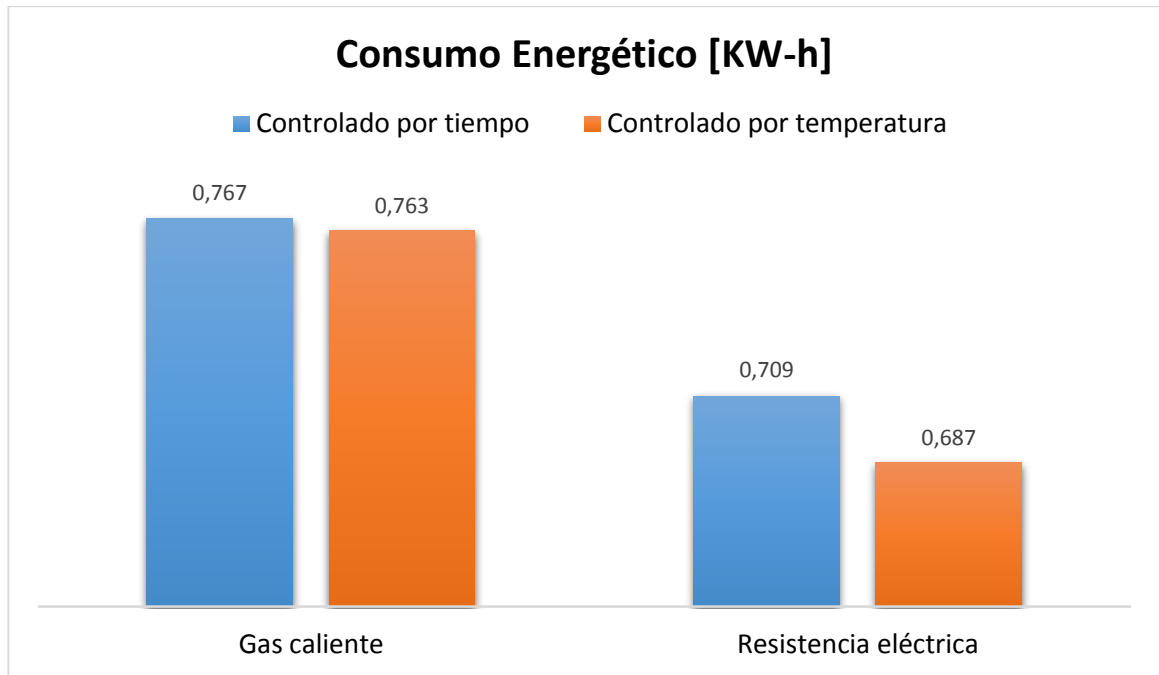
### 6.2.2.4. Consumo energético escenario 4. Resistencia – Tiempo

Tabla 30. Consumo energético total en 4 horas. Escenario 4

Consumo Energético Gas Caliente -Temperatura			
Etapas	Primera Prueba [KW-h]	Segunda Prueba [KW-h]	Promedio Total [KW-h]
Etapas de Refrigeración	0,651	0,615	
Etapas de Descongelamiento	0,078	0,075	
Goteo	0,000	0,000	
<b>TOTAL</b>	<b>0,729</b>	<b>0,689</b>	<b>0,709</b>

De acuerdo al promedio del consumo energético de cada escenario se realiza una gráfica (figura 39) para poder visualizar y comparar los consumos según el tipo de control y método de descongelamiento.

Figura 40. Comparación consumo energético



Dentro los resultados y graficas se puede concluir según los métodos de descongelamiento que:

Según el método de gas caliente

✓ Gráficamente se observa que cuando el banco de pruebas es controlado por tiempo o por temperatura consumen la misma energía eléctrica. Desde otro punto de vista, si se supone que el consumo en la etapa de refrigeración es constante para todas las pruebas, se llega a la conclusión de que en el método de gas caliente por temperatura es el que alcanza un mayor consumo energético ya que los tiempos de descongelamiento en este tipo de control son mayores y como la potencia es mayor en el descongelamiento, se incrementa el consumo.

✓ Se comprueba que para días más fríos el consumo de potencia disminuye tal y como se observa en la segunda prueba del escenario 1. En este caso no es el menor consumo energético de todas las pruebas ya que el sistema estaba efectuando el descongelamiento por gas caliente pero si se logra evidenciar el bajo consumo.

Según el método de resistencia eléctrica

✓ Se visualiza que presenta un mayor consumo cuando el banco de pruebas es controlado por tiempo y esto se debe a que la duración de la etapa de descongelamiento es menor comparado cuando es controlado por temperatura. Como el tiempo es menor, menor es el consumo de potencia ya que oscila en 0.100 [KW], por ende en el transcurso de las 4 horas trabaja más tiempo en la etapa de refrigeración.

En general, la conclusión más relevante se concibe a que el mayor consumo energético lo representa el método de gas caliente considerando que en la etapa de descongelamiento el compresor permanece encendido lo que no ocurre en el método de resistencia eléctrica.

Todos los datos registrados en cuanto a la potencia y consumo energético se encuentran en el anexo B del documento.

**6.2.3. Determinación del costo de la energía** Con los resultados del consumo energético total por 4 horas de trabajo, se desea comparar cual escenario tiende a ser más costoso por mes y por cuanto dinero lo supera según el precio de [KW-h] de la ESSA<sup>25</sup>. Este valor corresponde a la tarifa para el mes de octubre, mes en el cual se realizaron las pruebas. El precio de KW-h según para la universidad Industrial de Santander que se cataloga en tarifas no residenciales, oficial de nivel I es de \$/KW-h 468.64<sup>26</sup>. Ya con el consumo por cuatro horas se procede hallar el costo de la energía total por 24 horas de trabajo que es lo normal de un equipo de refrigeración doméstica

Tabla 31. Consumo energético en una hora de trabajo

Consumo energético total en 24 horas de trabajo [KW-h]				
\$KW-h	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
468.24	4.578	4.122	4.602	4.254

Seguidamente se multiplica por la tarifa y por los días del mes de octubre.

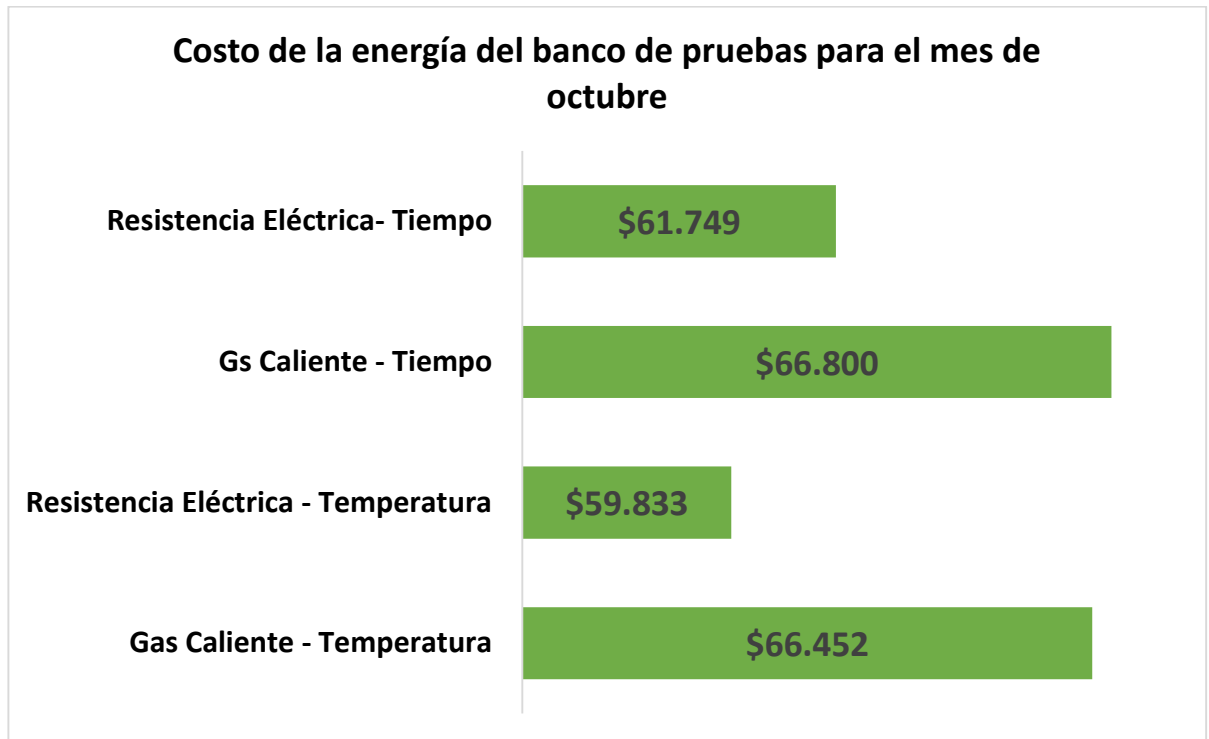
$$\text{\$Costo de la energía por mes} = \text{Consumo por 24 hora} * \text{tarifa por hora} * 31 \text{ días}$$

<sup>25</sup> Electrificadora de Santander S.A.

<sup>26</sup> Página web:

Disponible: <[http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/Tarifas%202016/Tarifa\\_ESSA\\_201610.pdf](http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/Tarifas%202016/Tarifa_ESSA_201610.pdf)>

Figura 41. Costo de la energía mensual para el banco de pruebas

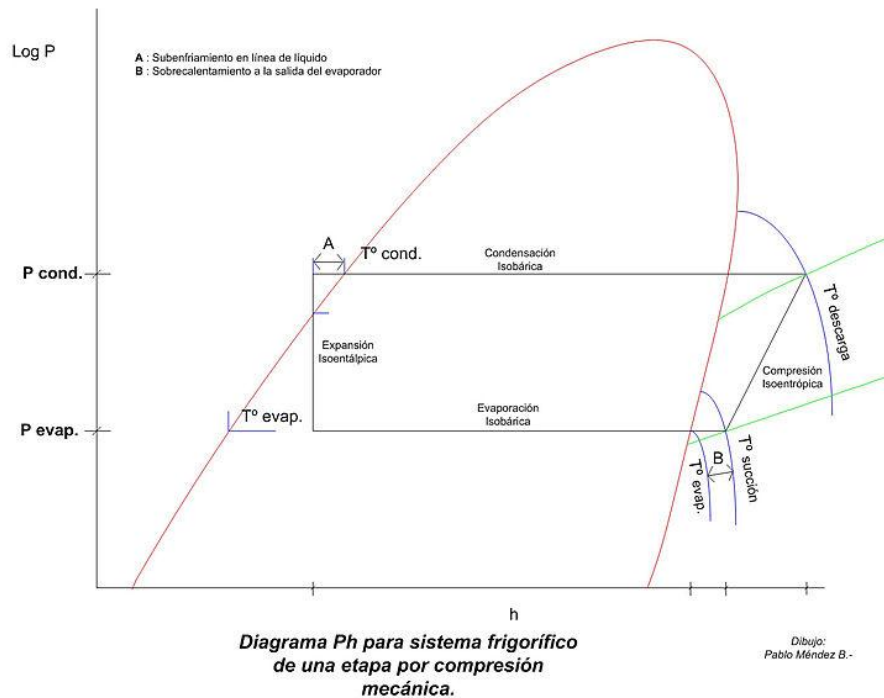


De esta forma se comprueba que el método de descongelación por gas caliente controlado por tiempo genera un mayor costo de la energía lo que no ocurre con el método de descongelamiento por resistencia cuando es controlado por temperatura ya que es el más económico.

### 6.3. COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y CONDENSACIÓN

Cómo se había comentado anteriormente en la parte de adquisición de datos, por medio de dos termopares acoplados al evaporador y a la entrada del condensador respectivamente, son registradas las temperaturas y por medio de una regresión lineal del R134-a de las tablas termodinámicas de Cengel, se grafica Presión vs Tiempo durante las 4 horas de ciclos de trabajo. Durante el ciclo de refrigeración las presiones y temperaturas se comportan como un proceso real del ciclo de refrigeración, en el cual se presenta un sobrecalentamiento a la salida del evaporador y sub-enfriamiento a la salida del condensador.

Figura 42. Diagrama Presión vs Entalpia ciclo de refrigeración real



Fuente:

Disponible: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Refrigeraci%C3%B3n\\_por\\_compresi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Refrigeraci%C3%B3n_por_compresi%C3%B3n)>

**6.3.1. Determinación de las presiones según la prueba de control.** Durante toda la prueba, a través de LabVIEW se registran las temperaturas y se grafican los comportamientos de la presión de evaporización y condensación. Mediante ensayos realizados días anteriores a las pruebas finales, se establecieron algunos parámetros que presentan una misma tendencia en cuanto a los tiempos y temperaturas ideales de refrigeración y descongelamiento los cuales dependen del método de descongelación. En las tablas 23 y 24 se pueden observar ciertos parámetros.

Tabla 32. Parámetros para realizar por tiempo los escenarios de prueba

Métodos de Descongelamiento	Tiempo Refrigeración [min]	Tiempo Descongelamiento [min]	Tiempo Goteo [min]
Resistencia	60	14	6
Gas caliente	60	8	6

Tabla 33. Parámetros para realizar por temperatura los escenarios de prueba

Métodos de Descongelamiento	Temperatura Refrigeración [°C]	Temperatura Descongelamiento [°C]	Tiempo Goteo [min]
Resistencia	-22	1	6
Gas caliente	-22	1,5	6

### 6.3.1.1. Comportamiento de presiones escenario 1. Gas caliente – Temperatura

Figura 43. Presión vs Tiempo. Primera prueba Gas Caliente Temperatura

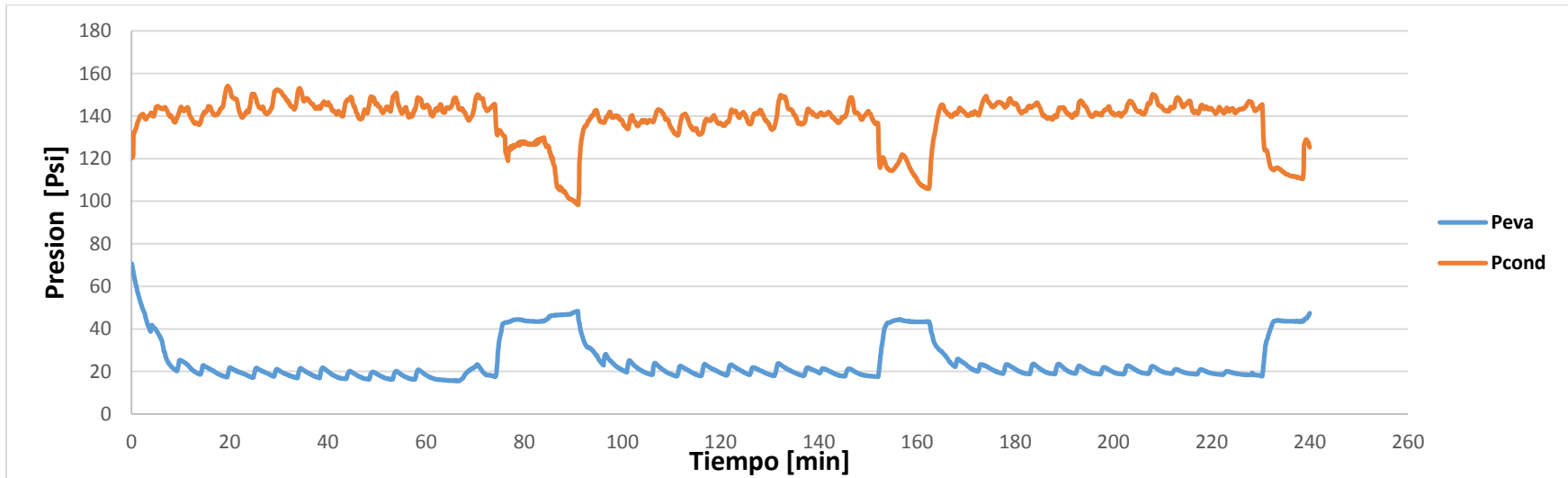


Tabla 34. Valores de tiempo, presión y temperatura a partir de la gráfica del escenario 1.

<b>Prueba 1 Hora: 7:20 am</b>		<b>Tiempo [min]</b>	<b>Evaporador</b>		<b>Condensador</b>	
			<b>Presión [Psi]</b>	<b>Tempe [°C]</b>	<b>Presión [Psi]</b>	<b>Tempe [°C]</b>
<b>1er Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	74	17,5	-22	145,17	38,6
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	86	44,79	1	126	33,8
	<b>Inicio de refrigeración</b>	91	44,37	4	98,33	26,2
<b>2do Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	152	17,51	-22	136	36,3
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	157	44,03	1	121,92	32,8
	<b>Inicio de refrigeración</b>	163	43,47	4,1	105,88	28,5
<b>3er Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	230	18,80	-21	143	38
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	238	43,5	0,8	110,62	29,8
	<b>Inicio de refrigeración</b>	-	-	-	-	-

### 6.3.1.2. Comportamiento de las presiones Escenario 2. Resistencia – Temperatura

Figura 44. Presión vs Tiempo. Segunda prueba Resistencia- Temperatura

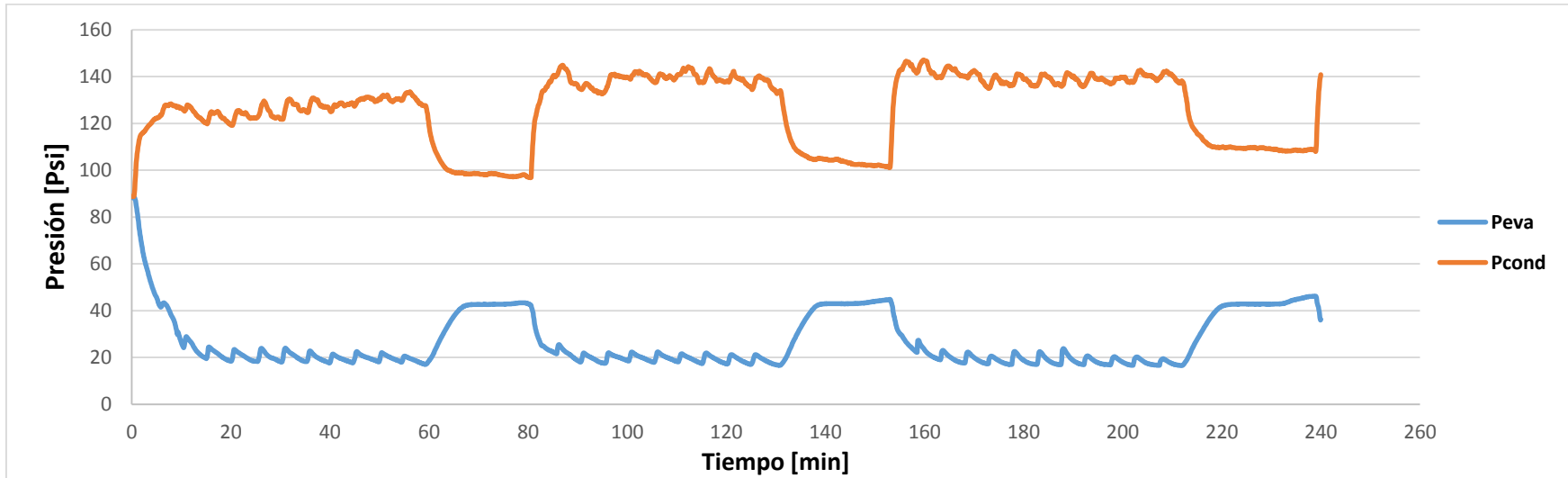


Tabla 35. Valores de tiempo, presión y temperatura a partir de la gráfica del escenario 2.

<b>Prueba 2 Hora: 6:35 am</b>		<b>Tiempo [min]</b>	<b>Evaporador</b>		<b>Condensador</b>	
			<b>Presión [Psi]</b>	<b>Temp [°C]</b>	<b>Presión [Psi]</b>	<b>Tempe [°C]</b>
<b>1er Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	59,3	17	-22	128	34.7
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	74	43	1	98	25.5
	<b>Inicio de refrigeración</b>	79,3	43	3,3	98	25.5
<b>2do Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	131	17	-22	134	36.4
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	147	43	1	102	26.8
	<b>Inicio de refrigeración</b>	153	45	3,5	101	26.5
<b>3er Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	212	17	-22	138	37.5
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	234	44	1	108	28.2
	<b>Inicio de refrigeración</b>	239	46	3,6	108	28.2

### 6.1.2.3. Comportamiento de las presiones escenario 3. Gas caliente - Tiempo

Figura 45. Presión vs Tiempo. Segunda prueba Gas caliente - Tiempo

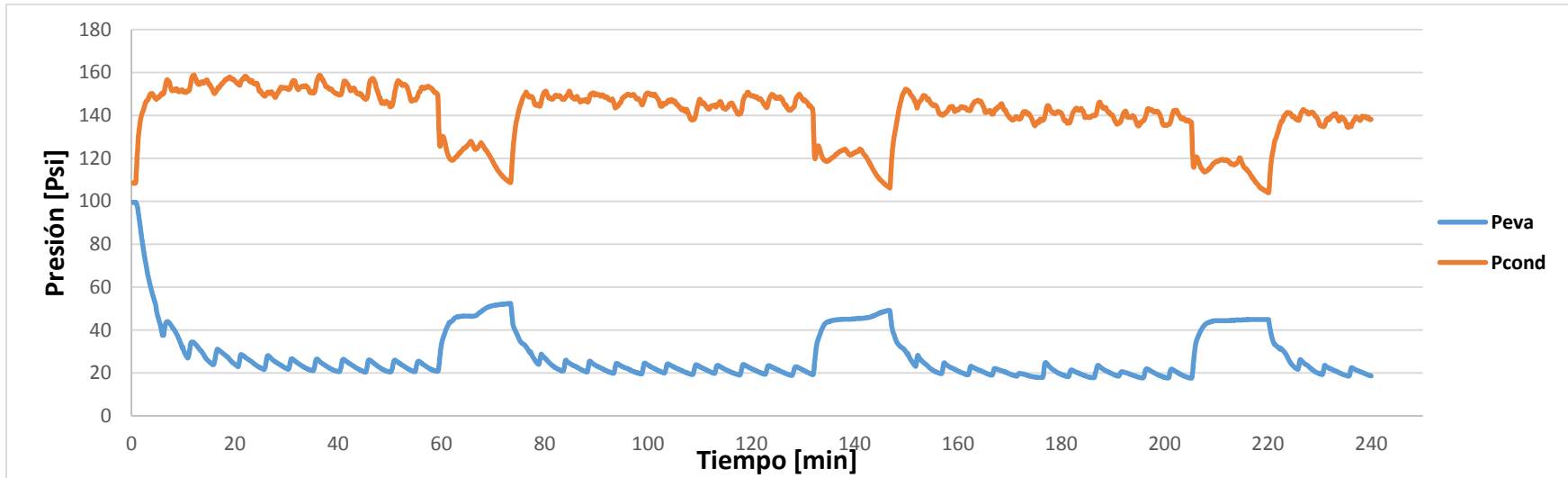


Tabla 36. Valores de tiempo, presión y temperatura a partir de la gráfica del escenario 3.

<b>Prueba 2 Hora: 2:10 pm</b>		<b>Tiempo [min]</b>	<b>Evaporador</b>		<b>Condensador</b>	
			<b>Presión [Psi]</b>	<b>Tempe [°C]</b>	<b>Presión [Psi]</b>	<b>Tempe [°C]</b>
<b>1er Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	59,4	21	-17	149	40.4
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	67,8	49	2,7	127	34.5
	<b>Inicio de refrigeración</b>	73,5	52	5,5	109	29.1
<b>2do Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	132	19	-18	143	38.8
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	141,3	45	1,3	124	33.7
	<b>Inicio de refrigeración</b>	146,8	49	3,4	107	28.5
<b>3er Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	205,3	18	-20	136	37
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	214,7	45	1	120	32.5
	<b>Inicio de refrigeración</b>	219,3	45	2,2	105	27.8

#### 6.1.2.4. Comportamiento de las presiones escenario 4. Resistencia – Tiempo

Figura 46. Presión vs Tiempo. Segunda prueba Resistencia - Tiempo

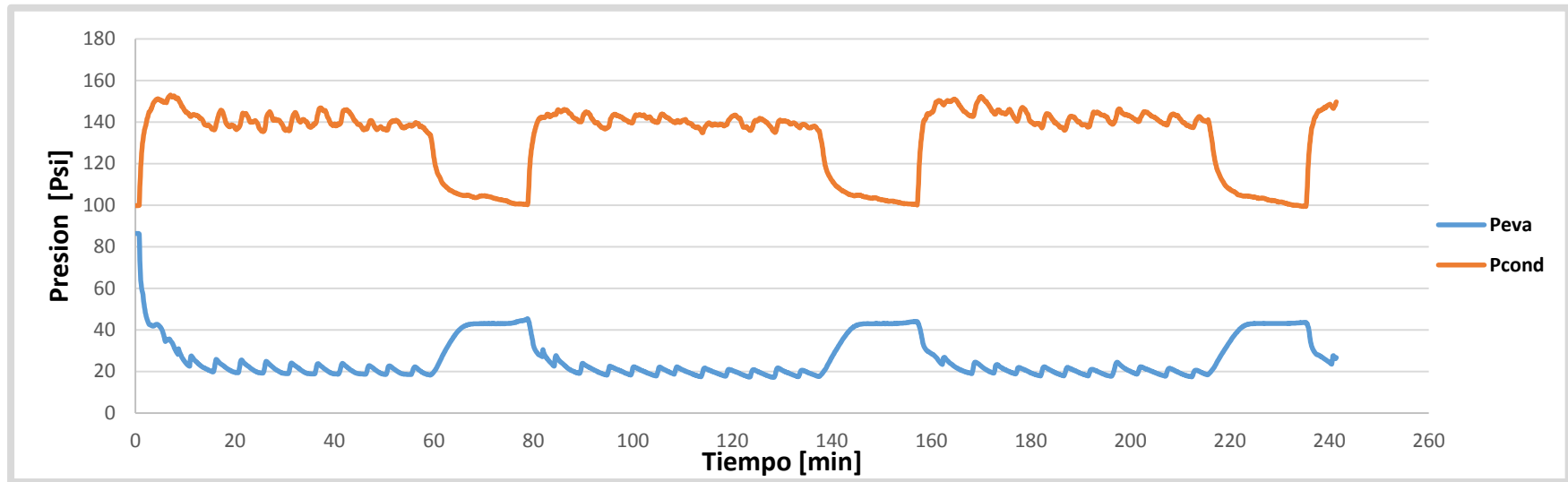


Tabla 37. Valores de tiempo, presión y temperatura a partir de la gráfica del escenario 4.

<b>Prueba 2 - Hora: 2:00 pm</b>		<b>Tiempo [min]</b>	<b>Evaporador</b>		<b>Condensador</b>	
			<b>Presión [Psi]</b>	<b>Temp [°C]</b>	<b>Presión [Psi]</b>	<b>Temp [°C]</b>
<b>1er Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	59,33	18	-21	134	36.4
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	73	43	0,8	103	27.2
	<b>Inicio de refrigeración</b>	78,83	45	1.5	100	26.2
<b>2do Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	137,42	17	-21	136	37
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	150,67	43	0,7	102	26.8
	<b>Inicio de refrigeración</b>	157,17	44	2	100	26.2
<b>3er Ciclo de operación</b>	<b>Inicio Descongelamiento</b>	215,58	18	-21	141	38.3
	<b>Inicio de Tiempo de goteo</b>	228,58	43	0,7	102	26.8
	<b>Inicio de refrigeración</b>	235,33	43	2.5	99	25.8

A continuación se presentan los resultados de las cuatro gráficas propuestas anteriormente y se hace un detalle del comportamiento de cada escenario según el método de descongelamiento.

Según el método de gas caliente

✓ Para la etapa de descongelamiento en la presión de condensación, se observa que inicia drásticamente con una caída de presión y posteriormente un ligero aumento hasta el inicio de la etapa de goteo. Esto ocurre a causa de que el termopar que registra la temperatura de condensación se encuentra cerca de la tubería del bypass de gas caliente. Debido a que para eliminar la escarcha se requiere un aumento la temperatura, al pasar por el Bypass 2 o 3 minutos después del inicio se ve reflejado en la toma de datos. En cuanto a la presión de evaporización se percibe una tendencia casi que constante hasta inicio de refrigeración.

✓ Durante la etapa de goteo se visualiza que la presión de condensación comienza a descender, debido a que todos los dispositivos se encuentran desenergizados y la temperatura de condensación tiende a llegar a la temperatura ambiente.

Según el método de resistencia eléctrica

✓ Al inicio de la etapa de descongelamiento por resistencia eléctrica se observa el aumento de la presión de evaporización debido a la ganancia de calor que se suministra al encender la resistencia y permanece constante durante toda la etapa. La presión de condensación disminuye, como resultado de que el compresor en esta etapa permanece desenergizado.

✓ En la etapa de goteo, se observa que la presión de condensación sigue en un comportamiento constante llegando a la temperatura ambiente.

Según los dos métodos

✓ Durante el inicio de la etapa de refrigeración se visualiza como baja la presión de evaporización y aumenta la presión de condensación, además, en este ciclo se notan unos cortos altibajos de las presiones, esto ocurre debido a que cada 5 minutos se abre la puerta de la cámara de congelación para agregar una carga por medio de un atomizador de agua descrito anteriormente.

✓ Tanto en la etapa descongelamiento y la etapa de goteo las presiones tienden a igualarse, pero como los tiempos en ambas etapas son cortos no alcanzan a nivelarse. Igualmente la obstrucción que ejerce la válvula solenoide de líquido ubicada a la salida del condensador impiden que se igualen debido a que se encuentra desenergizada.

Los datos en cuanto a la toma de presiones de evaporización y condensación se encuentra en el anexo C del documento.

## **7. GUIA DEL ESTUDIANTE**

La realización de la guía se basa específicamente para que en la asignatura electiva de refrigeración y aire acondicionado de la Escuela de Ingeniería Mecánica se lleven a cabo clases teórico-prácticas donde el estudiante pueda aplicar y observar lo aprendido en el aula de clase.

La guía cuenta con una explicación sobre la formación de escarcha, los problemas que acarrea y que procedimiento llevar para encontrar la solución. El pilar fuerte de la guía es comprender cuales son los métodos de descongelamiento, los tipos de control y lo que acontece en cada etapa del sistema de refrigeración. La guía viene soportada por una hoja de datos para que el estudiante registre los datos obtenidos.

La guía se encuentra en el anexo D del documento.

## 8. CONCLUSIONES

Se implementó al laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la Escuela de Ingeniería Mecánica, un banco de pruebas para el análisis de descongelamiento por resistencia eléctrica y por gas caliente en un sistema de refrigeración por compresión de vapor.

Respecto a la duración de descongelamiento cuando el banco es controlado por temperatura, se comprobó que por gas caliente es eficaz aproximadamente en un 45% en comparación con la resistencia eléctrica, debido a que requiere menos tiempo para eliminar la totalidad de la escarcha presente en el evaporador.

A pesar de que el gas caliente es un sistema más rápido en cuanto al tiempo de descongelación, este método de descongelamiento posee un mayor consumo de energía eléctrica. En el transcurso de las 4 horas consume alrededor de 10 % más de energía que el método por resistencia eléctrica.

Para el monitoreo de las temperaturas y presiones de evaporación y condensación del banco de pruebas se adecuó de una interfaz gráfica realizada en LabVIEW para adquisición de datos y simulación de descongelamiento.

Ya que los estudiantes requieren de un manual para llevar a cabo las prácticas establecidas, se realizó una guía de laboratorio para que el estudiante tenga una noción del funcionamiento, metodología y pueda registrar los datos ofrecidos por el banco de pruebas.

## **9. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES**

Se comprueba que en días donde la temperatura ambiente del laboratorio se encuentre alta, al sistema de refrigeración le es difícil llegar a la temperatura de inicio de descongelamiento. Esto ocurre si se está trabajando el banco de pruebas en control por necesidad.

La apertura de la puerta e incremento de la carga directamente al evaporador en la cámara de congelación, incrementa sustancialmente la potencia del banco de pruebas, generando un mayor costo de energía por tiempo transcurrido.

## 9. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Continuar con el crecimiento del laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la escuela de Ingeniería Mecánica implementado más proyectos enfocados a bancos de laboratorio donde los estudiantes puedan observar experimentalmente problemas y soluciones de la ingeniería aplicada.

Adherir al banco de pruebas un sistema donde se pueda extraer e incorporar otros tipos de refrigerantes como R-600 o R-12 y así comprobar las tensiones generadas, los tiempos de trabajo y temperaturas generadas por cada refrigerante.

Dada la interfaz didáctica realizada en LabVIEW, aprovechar de este Software todo su potencial para realizar mediciones, toma de datos y control en los métodos de descongelamiento sin necesidad de recurrir al controlador Full Gauge TC-900E.

Dotar al laboratorio de un analizador de potencia eléctrica para la toma de potencia activa y reactiva no solo para el banco de pruebas sino para los demás sistemas de refrigeración de laboratorio que requieran de este dispositivo.

## BIBLIOGRAFIA

ALARCON, Jose Creus. Tratado práctico de refrigeración automática. Décima edición. México: Marcombo, Boixareu editores, 1995.

ALVAREZ, Emilio Ojea, Tratado general de refrigeración. Segundo Ejemplar. Argentina: Editorial Bell, 1973.

BARAJAS, Daniel, GÓMEZ, Martha. Trabajo de grado titulado: Determinación del consumo energético de un sistema de refrigeración en carga parcial bajo esquemas de control continuo y control on-off. Universidad Industrial de Santander, 2009.

DOSSAT, Roy J. Principles of refrigeration. Primera edición. Compañía Editorial Continental, S. A. 1961.

MELGAREJO, Pablo. Aislamiento, calculo y construcción de cámara frigoríficas. Primera Edición. España: A. MADRID VICENTE, EDIONES, 1995.

QUIJANO, Oscar, GARCÍA, Marco. Trabajo de grado titulado: Diseño y construcción de un banco de pruebas para el control de diferentes tipos de descongelamiento en un sistema de refrigeración. Universidad Industrial de Santander, 2008.

STOECKER, W. F. Refrigeración y aire acondicionado. España: Ediciones del Castillo S. A. 1965

**ANEXO A. Manual de controlador digital para refrigeración y deshielo TC-900e Power.**

Este anexo se encuentra en la carpeta de anexos con el nombre de ANEXO A.

**ANEXO B. Registro de datos de la potencia total del banco experimental para las dos pruebas de los cuatro escenarios.**

Este anexo se encuentra en la carpeta de anexos con el nombre de ANEXO B.

**ANEXO C. Registro de datos de la presión de evaporización y presión de condensación a través del tiempo de trabajo para las dos pruebas de los cuatro escenarios.**

Este anexo se encuentra en la carpeta de anexos con el nombre de ANEXO B.

## **ANEXO D. Guía del Estudiante**

Este anexo se encuentra en la carpeta de anexos con el nombre de ANEXO D

**ANEXO E. Hoja de datos para el registro de variables que se miden durante la práctica.**



<b>ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO	Fecha:
DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGETICO BANCO NO FROST	Hora:

<b>Prueba:</b>		<b>CONSUMO ENERGETICO TOTAL [KW-h]</b>
■ Inicio de Refrigeración	■ Inicio descongelamiento	
	■ Tiempo goteo	

Tiempo		COMPRESOR			BANCO TOTAL		POTENCIA COMPRESOR [KW]	POTENCIA TOTAL BANCO [KW]	CONSUMO ENERGETICO x min [KW-h]
[min]	[hora]	Voltaje [v]	Corriente [A]	PF	Voltaje [V]	Corriente [A]			
1	0,0167								
2	0,0167								
3	0,0167								
4	0,0167								
5	0,0167								
6	0,0167								
7	0,0167								
8	0,0167								
9	0,0167								
10	0,0167								
11	0,0167								
12	0,0167								
13	0,0167								
14	0,0167								
15	0,0167								
16	0,0167								
17	0,0167								
18	0,0167								
19	0,0167								
20	0,0167								

...	...								
22	0,0167								
23	0,0167								
24	0,0167								
25	0,0167								
26	0,0167								
27	0,0167								
28	0,0167								
29	0,0167								
30	0,0167								
31	0,0167								
32	0,0167								
33	0,0167								
34	0,0167								
35	0,0167								
36	0,0167								
37	0,0167								
38	0,0167								
39	0,0167								
40	0,0167								
41	0,0167								
42	0,0167								
43	0,0167								
44	0,0167								
45	0,0167								
46	0,0167								
47	0,0167								
48	0,0167								
49	0,0167								
50	0,0167								
51	0,0167								
52	0,0167								
53	0,0167								
54	0,0167								
55	0,0167								
56	0,0167								
57	0,0167								
58	0,0167								
59	0,0167								
60	0,0167								

61	0,0167								
62	0,0167								
63	0,0167								
64	0,0167								
65	0,0167								
66	0,0167								
67	0,0167								
68	0,0167								
69	0,0167								
70	0,0167								
71	0,0167								
72	0,0167								
73	0,0167								
74	0,0167								
75	0,0167								
76	0,0167								
77	0,0167								
78	0,0167								
79	0,0167								
80	0,0167								
81	0,0167								
82	0,0167								
83	0,0167								
84	0,0167								
85	0,0167								
86	0,0167								
87	0,0167								
88	0,0167								
89	0,0167								
90	0,0167								
91	0,0167								
92	0,0167								
93	0,0167								
94	0,0167								
95	0,0167								
96	0,0167								
97	0,0167								
98	0,0167								
99	0,0167								
100	0,0167								

101	0,0167								
102	0,0167								
103	0,0167								
104	0,0167								
105	0,0167								
106	0,0167								
107	0,0167								
108	0,0167								
109	0,0167								
110	0,0167								
111	0,0167								
112	0,0167								
113	0,0167								
114	0,0167								
115	0,0167								
116	0,0167								
117	0,0167								
118	0,0167								
119	0,0167								
120	0,0167								
121	0,0167								
122	0,0167								
123	0,0167								
124	0,0167								
125	0,0167								
126	0,0167								
127	0,0167								
128	0,0167								
129	0,0167								
130	0,0167								
131	0,0167								
132	0,0167								
133	0,0167								
134	0,0167								
135	0,0167								
136	0,0167								
137	0,0167								
138	0,0167								
139	0,0167								
140	0,0167								

141	0,0167								
142	0,0167								
143	0,0167								
144	0,0167								
145	0,0167								
146	0,0167								
147	0,0167								
148	0,0167								
149	0,0167								
150	0,0167								
151	0,0167								
152	0,0167								
153	0,0167								
154	0,0167								
155	0,0167								
156	0,0167								
157	0,0167								
158	0,0167								
159	0,0167								
160	0,0167								
161	0,0167								
162	0,0167								
163	0,0167								
164	0,0167								
165	0,0167								
166	0,0167								
167	0,0167								
168	0,0167								
169	0,0167								
170	0,0167								
171	0,0167								
172	0,0167								
173	0,0167								
174	0,0167								
175	0,0167								
176	0,0167								
177	0,0167								
178	0,0167								
179	0,0167								
180	0,0167								

181	0,0167								
182	0,0167								
183	0,0167								
184	0,0167								
185	0,0167								
186	0,0167								
187	0,0167								
188	0,0167								
189	0,0167								
190	0,0167								
191	0,0167								
192	0,0167								
193	0,0167								
194	0,0167								
195	0,0167								
196	0,0167								
197	0,0167								
198	0,0167								
199	0,0167								
200	0,0167								
201	0,0167								
202	0,0167								
203	0,0167								
204	0,0167								
205	0,0167								
206	0,0167								
207	0,0167								
208	0,0167								
209	0,0167								
210	0,0167								
211	0,0167								
212	0,0167								
213	0,0167								
214	0,0167								
215	0,0167								
216	0,0167								
217	0,0167								
218	0,0167								
219	0,0167								
220	0,0167								

221	0,0167								
222	0,0167								
223	0,0167								
224	0,0167								
225	0,0167								
226	0,0167								
227	0,0167								
228	0,0167								
229	0,0167								
230	0,0167								
231	0,0167								
232	0,0167								
233	0,0167								
234	0,0167								
235	0,0167								
236	0,0167								
237	0,0167								
238	0,0167								
239	0,0167								
240	0,0167								