

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA VÁLVULA DE EXPANSIÓN DE FLUJO
DE REFRIGERANTE CON CONTROL ELECTRÓNICO**

**JOSE PABLO PÁEZ MARTÍNEZ
ALFREDO CRISTOBAL OSORIO GARCIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2008**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA VÁLVULA DE EXPANSIÓN DE FLUJO
DE REFRIGERANTE CON CONTROL ELECTRÓNICO**

**JOSE PABLO PÁEZ MARTÍNEZ
ALFREDO CRISTOBAL OSORIO GARCIA**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director de Trabajo de grado
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2008**

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a todas las personas que con su ayuda contribuyeron a que este proyecto se desarrollara:

- Ingeniero Omar Armando Gelvez Arocha, por su valiosa colaboración en la dirección del proyecto de grado.
- A Rosenberth Valdivieso, por su apoyo y orientación permanente.
- A todos mis amigos por su compañía y apoyo durante la realización del proyecto.

DEDICATORIA

A Dios que permite alcanzar todas mis metas.

A mis padres Alfredo y Zoraida quienes siempre manifiestan su amor y apoyo incondicional.

A Yadi, Ferdy, Patri, Lina, mis hermanos porque este logro también es de ellos.

A Janet y Camilita que son motivo de felicidad en mi vida.

A mi tía Yamel por su comprensión, colaboración y tolerancia.

A Isnardo Mendivelso por mostrarme el camino de la rectitud y confianza en sí mismo.

DEDICATORIA

A mis padres Hilda y Hector José, a quienes agradezco su amor, comprensión y apoyo incondicional en los momentos difíciles durante la realización de este proyecto.

A mis hermanos de alma, Claudia Lucia y Carlos Alberto, quienes son un ejemplo para toda mi vida.

A mis sobrinos Julián Andrés y Ana Isabel, quienes me iluminan cada día.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
2. GENERALIDADES DE REFRIGERACIÓN	2
2.1. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	2
2.1.1 Compresor	3
2.1.2 Condensador.	3
2.1.3 Válvula de expansión.	3
2.1.4 El evaporador	3
2.2. CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR	3
2.2.1 Proceso en el dispositivo de control de flujo	4
2.2.2 Proceso en el evaporador	5
2.2.3 Proceso en el compresor.	5
2.2.4 Proceso en el condensador	5
3. LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN Y SUS COMPONENTES	6
3.1. INTRODUCCIÓN	6
3.2 COMPONENTES MECÁNICOS DEL CUARTO FRÍO	7
3.2.1 Cámara de enfriamiento	7
3.2.2 Compresor	9
3.2.3 Evaporador	10
3.2.4 Condensador	11
3.2.5 Sistema de regulación de flujo de refrigerante	12
3.2.5.1. Válvulas de expansión termostáticas.	12
3.2.5.2 Válvula de expansión termostática	13
3.2.6 Separador de aceite.	15
3.2.7 Recipiente de succión.	16
3.2.8 Recipiente de líquido de refrigerante	17
3.2.9 Amortiguador de vibraciones	18

3.2.10	Visor	18
3.2.11	Intercambiador de calor	19
3.2.12	Válvula solenoide	20
3.2.13	Presostato	21
3.2.14	Manómetros	22
4.	CENTRAL DE POTENCIA, CONTROL Y MONITOREO DEL CUARTO FRÍO	25
4.1	TABLERO DE CONTROL	25
4.1.1	Esquema general del tablero de control	26
4.2.2	Componentes del circuito de potencia	28
4.2.2.1	Variador de velocidad	29
4.2.2.2	Interruptor termomagnético.	30
4.2.2.3	Amperímetro digital	30
4.2.2.4	Voltímetro análogo	31
4.2.2.5.	Transformador	32
4.2.2.6	Contactores térmicos KM1 y KM2.	33
4.2.2.7	Contactador térmico KM3.	33
4.3	CIRCUITO DE MANDO	34
4.3.1	Esquema del circuito de mando.	35
4.4	HARDWARE DE MONITOREO Y CONTROL.	36
4.4.1	Modulo de red FP-1000.	36
4.4.2	Modulo FP-TC-120	37
4.4.3	Modulo FP-A0-210	39
4.4.4	Módulo FP-DO-400	39
5.	DISPOSITIVOS DE CONTROL DE FLUJO.	42
5.1	TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CONTROL DE FLUJO	42
5.1.1	Válvula de expansión termostática (V.E.T.)	43
5.1.1.1	Funcionamiento de la válvula de expansión termostática	44
5.1.1.2	Control del sobrecalentamiento.	45
5.1.2	Válvula de expansión electrónica	48

5.2 CONVERSIÓN DE UNA VÁLVULA DE EXPANSIÓN TERMOSTÁTICA EN UNA VÁLVULA DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICA	51
5.2.1 Modificación a la V.E.T. para convertirla a V.E.E.	52
5.2.1.1 Selección del fluido interno dentro del bulbo para una respuesta adecuada.	55
5.2.1.2 Determinación de las características del resorte a utilizar.	57
5.2.1.3 Selección de la mejor forma de suministrar la energía para la expansión del fluido dentro del bulbo remoto.	59
5.2.1.3.1 Calentamiento por resistencia interior.	60
5.2.1.3.2 Calentamiento-enfriamiento con agua.	61
5.2.1.3.3 Calentamiento-enfriamiento con aire.	65
5.2.1.4 Factores a tener en cuenta para la selección del mecanismo de calentamiento-enfriamiento del bulbo	67
6. ESCENARIOS DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	68
6.1 MODIFICACIONES EN LA CARGA DEL SISTEMA	70
6.2 MODIFICACIONES AL SISTEMA DE CONTROL	71
6.2.1 Controlabilidad de la VEE	71
6.2.1.1 Mecanismo calentamiento-enfriamiento por agua	71
6.2.1.2 Mecanismo calentamiento-enfriamiento por aire.	74
6.2.1.3 Aislamiento del tubo capilar del bulbo	75
6.2.1.4 Modificación de la tensión del resorte.	76
6.2.2 Controlabilidad del compresor	76
7. PRUEBAS	77
7.1 PRUEBA 1: Comportamiento de la V.E.T y V.E.E. ante perturbaciones (Abrir y cerrar puerta).	80
7.2 PRUEBA 2: Comportamiento de la V.E.E. con dos perturbaciones al sistema	82
7.3 PRUEBA 3: Comportamiento de la V.E.E. con aislamiento del tubo capilar del bulbo.	84
7.4 PRUEBA 4: Comportamiento de la V.E.E. ante la disminución del vástago de ajuste de la VEE.	85

7.5 PRUEBA 5: Comportamiento de la V.E.E. desde el arranque del sistema	87
7.6 PRUEBA 6: Comportamiento de la V.E.E ante una perturbación con la resistencia eléctrica R1.	88
7.7 PRUEBA 7: Comportamiento de la V.E.T. ante una perturbación con la resistencia eléctrica R1.	90
7.8 PRUEBA 8: Comportamiento de la V.E.E con mecanismo calentamiento-enfriamiento con aire.	91
7.9 PRUEBA 9: Comportamiento de la V.E.E con mecanismo calentamiento-enfriamiento con aire y regulando el voltaje a la resistencia térmica.	93
7.10 PRUEBA 10: Comportamiento de la VET con variador de velocidad	94
7.11 PRUEBA 11: VEE con control PID de la resistencia térmica y el variador de velocidad.	96
7.12 PRUEBA 12: VEE con variador de velocidad registrando el consumo de potencia de la resistencia térmica.	98
7.13 PRUEBA 13: VEE sin variador de velocidad registrando el consumo de potencia de la resistencia térmica.	101
8. CONTROLADOR DESDE EL COMPUTADOR	107
8.1 PROGRAMA PRINCIPAL	107
8.1.1 Interfase con el usuario	108
8.1.1.1 Panel frontal	108
8.1.1.2 Diagrama de bloque	109
8.1.1.3 Paletas de LabVIEW	112
8.1.2 Grafica de las temperaturas en todo el proceso	113
8.1.3 PID variador de velocidad	114
8.1.4 PID Resistencia térmica	117
8.1.4.1. Datos en Excel.	119
8.2 DISEÑO DEL HARDWARE PARA EL BANCO PARA PRUEBAS DE REFRIGERACIÓN	120
8.2.1 Esquema del motor del ventilador	120
8.2.2 Esquema de la resistencia térmica	121

8.3 COSTOS DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICA Y LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN TERMOSTÁTICA CON CONTROL ELECTRÓNICO	125
CONCLUSIONES	126
BIBLIOGRAFIA	130

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes de un sistema de refrigeración	2
Figura 2. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor	4
Figura 3. Cámara de enfriamiento.	8
Figura 4. Motocompresor hermético	9
Figura 5. Evaporador	10
Figura 6. Condensador.	11
Figura 7. Válvula de expansión termostática y su ubicación en el circuito de refrigeración	13
Figura 8. Válvula de expansión termostática con control electrónico	14
Figura 9. Separador de aceite	15
Figura 10. Recipiente de succión	16
Figura 11. Recipiente de líquido de refrigerante	17
Figura 12. Amortiguador de vibraciones	18
Figura 13. Visor	19
Figura 14. Intercambiador de calor	20
Figura 15. Válvula Solenoide	21
Figura 16. Presostato	22
Figura 17. Manómetros	23
Figura 18. Esquema del sistema de refrigeración	24
Figura 19. Tablero de control	25
Figura 20. Esquema general del tablero de control	26
Figura 21. Esquema del circuito de control de potencia	28
Figura 22. Variador de velocidad	29
Figura 23. Interruptor termomagnético	30
Figura 24. Amperímetro digital	31
Figura 25. Voltímetro análogo	32
Figura 26. Transformadores	32

Figura 27. Contactores KM1 Y KM2	33
Figura 28. Contactor térmico KM3	34
Figura 29. Esquema del circuito de mando	35
Figura 30. Sistema FieldPoint	36
Figura 31. Modulo de red FP-1000	37
Figura 32. Modulo de red FP-TC-120	37
Figura 33. Modulo de salidas análogas FP AO 210	39
Figura 34. Modulo de salidas digitales FP DO 400	40
Figura 35. Diagramas de conexión del FieldPoint	41
Figura 36. Vista en corte de la válvula de expansión termostática	44
Figura 37. Diagrama de fuerzas	45
Figura 38. Control del sobrecalentamiento	46
Figura 39. Sobrecalentamiento a bajas temperaturas de evaporación	47
Figura 40. Sobrecalentamiento debido a la caída de presión en el evaporador	48
Figura 41. Válvula de Expansión Electrónica	49
Figura 42. Operación de la Válvula de Expansión Electrónica	50
Figura 43. Conversión de una VET en una VEE	52
Figura 44. Elementos a modificar en la válvula de expansión	54
Figura 45. Válvula de expansión con glicerina en el bulbo	56
Figura 46. Cambio de resorte en la V.E.E.	58
Figura 47. Resistencia en la válvula de expansión.	60
Figura 48. Calentamiento-enfriamiento con dos tanques de almacenamiento	62
Figura 49. Sistema calentamiento-enfriamiento del bulbo con recirculación del agua	64
Figura 50. Sistema calentamiento-enfriamiento del bulbo con aire	66
Figura 51. Escenarios del proceso de investigación	69
Figura 52. Componentes del balance de energía en el cuarto frío	70
Figura 53. Recirculación de agua con control on-off	72
Figura 54. Calentamiento-enfriamiento por aire	75
Figura 55. Proceso De Pruebas	78

Figura 56. Comportamiento de la V.E.T. a la perturbación	81
Figura 57. Comportamiento de la V.E.E. a la perturbación	82
Figura 58. Ventana principal del software	109
Figura 59. Esquema de la programación gráfica del control	110
Figura 60. Diagrama de bloque	111
Figura 61. Tendencia de temperaturas en el panel frontal	114
Figura 62. Control variador de velocidad	114
Figura 63. Control PID variador de velocidad	115
Figura 64. Programación de la acción PID en el software de control	116
Figura 65. Control PID Resistencia Térmica	117
Figura 66. Control resistencia térmica	118
Figura 67. Almacenamiento de datos en Microsoft Excel	119
Figura 68. Datos registrados en Excel	119
Figura 69. Esquema del motor del ventilador	120
Figura 70. Esquema de la resistencia térmica	122
Figura 71. Tarjeta de control de la resistencia térmica y ventilador	123
Figura 72. Tarjeta de alimentación del FieldPoint	124

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aparatos Que Conforman el Sistema de Refrigeración.	7
Tabla 2. Ficha técnica motocompresor	9
Tabla 3. Características técnicas del evaporador	11
Tabla 4. Características técnicas del condensador.	12
Tabla 5. Características técnicas de las válvulas de expansión termostáticas	13
Tabla 6. Características técnicas válvula de expansión termostática con control electrónico	15
Tabla 7. Características técnicas separador de aceite	16
Tabla 8. Características técnicas recipiente de succión	17
Tabla 9. Características técnicas recipiente de líquido de refrigerante	18
Tabla 10. Determinación de la humedad del sistema por medio del visor.	19
Tabla 11. Características técnicas válvula solenoide	21
Tabla 12. Características técnicas presostato	22
Tabla 13. Características técnicas manómetros	23
Tabla 14. Función de las bornas	30
Tabla 15. Conexión de equipos a cada una de las líneas	31
Tabla 16. Ubicación termocuplas.	38
Tabla 17. Acción de control de la VET y VEE	52
Tabla 18. Capacidad calórica del agua, glicerina y R-134a y sus ventajas	56
Tabla 19. Presión ejercida por el resorte para la VET y la VEE	58
Tabla 20. Tiempo de abertura y cierre de la V.E.E.	63
Tabla 21. Propiedades del agua y del aire.	67
Tabla 22. Control on-off del mecanismo calentamiento-enfriamiento por agua	72
Tabla 23. Diferencia de temperaturas para diferentes flujos de agua	74
Tabla 24. Velocidades del flujo de aire	75

Tabla 25. Condiciones de las pruebas de controlabilidad del sobrecalentamiento de acuerdo a las modificaciones en el sistema de control y/o la carga de sistema	79
Tabla 26. Condición de operación de la prueba 1 respecto de la carga y el sistema de control	80
Tabla 27. Condición de operación de la prueba 2 respecto de la carga y el sistema de control	82
Tabla 28. Condición de operación de la prueba 3 respecto de la carga y el sistema de control	84
Tabla 29. Condición de operación de la prueba 4 respecto de la carga y el sistema de control	85
Tabla 30. Condición de operación de la prueba 5 respecto de la carga y el sistema de control	87
Tabla 31. Condición de operación de la prueba 6 respecto de la carga y el sistema de control	88
Tabla 32. Condición de operación de la prueba 7 respecto de la carga y el sistema de control	90
Tabla 33. Condición de operación de la prueba 8 respecto de la carga y el sistema de control	91
Tabla 34. Condición de operación de la prueba 9 respecto de la carga y el sistema de control	93
Tabla 35. Condición de operación de la prueba 10 respecto de la carga y el sistema de control	94
Tabla 36. Condición de operación de la prueba 11 respecto de la carga y el sistema de control	96
Tabla 37. Condición de operación de la prueba 12 respecto de la carga y el sistema de control	98
Tabla 38. Condición de operación de la prueba 13 respecto de la carga y el sistema de control	101
	102

Tabla 39. Respuesta de la VEE sin variador de velocidad ante las perturbaciones	103
Tabla 40. Respuesta de la VEE con variador de velocidad ante las perturbaciones	104
Tabla 41. Respuesta de la VET con variador de velocidad ante las perturbaciones	105
Tabla 42. Respuesta de la VET sin variador de velocidad ante las perturbaciones	106
Tabla 43. Voltaje suministrado al Motor del Ventilador	118
Tabla 44. Valor en el mercado de la válvula de expansión electrónica y la válvula de expansión termostática con control electrónico.	125

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Capacidad del compresor vs Temperatura de evaporación	10
Grafica 2. Balance de fuerzas de una válvula de expansión convencional y la válvula de expansión con control electrónico	57
Grafica 3. Temperatura del bulbo externo para diferentes temperaturas de evaporación en la V.E.E.	59
Gráfica 4. Comportamiento de la V.E.T. y V.E.E. con perturbaciones	81
Gráfica 5. V.E.E. con doble perturbación	83
Gráfica 6. V.E.E. con aislamiento del tubo capilar del bulbo	85
Gráfica 7. V.E.E. con disminución del vástago de ajuste	86
Gráfica 8. Comportamiento de la V.E.E. desde el arranque del sistema	88
Gráfica 9. V.E.E. con una perturbación R1	89
Gráfica 10. V.E.T. con una perturbación R1	91
Gráfica 11. Sistema calentamiento-enfriamiento con aire de la V.E.E.	92
Gráfica 12. Calentamiento-enfriamiento con aire de la V.E.E.	94
Gráfica 13. VET con variador de velocidad	95
Gráfica 14. Frecuencia del variador de velocidad para la VET	96
Gráfica 15. VEE con PID de la resistencia y variador de velocidad	97
Gráfica 16. Variador de velocidad para la VEE	98
Gráfica 17. VEE y consumo de potencia de la resistencia térmica	100
Gráfica 18. Variador de velocidad y tiempo de encendido de la resistencia térmica	100
Gráfica 19. VEE sin variador de velocidad registrando el consumo de potencia de la resistencia térmica.	102
Gráfica 20. Consumo de potencia de la resistencia térmica	102
Gráfica 21. Sobrecalentamiento de la VEE sin variador de velocidad	103
Grafica 22. Sobrecalentamiento de la VEE con variador de velocidad	104
Grafica 23. Sobrecalentamiento VET con variador de velocidad	105

Grafica 24. Sobrecalentamiento de la VET sin variador de velocidad	106
Grafica 25 Algunas paletas de LabVIEW	112
Grafica 26. Visualización de las temperaturas del cuarto frío	113

ANEXOS

Pág.

ANEXO A. SELECCIÓN DE LA VALVULA DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICA DANFOSS	131
--	-----

GLOSARIO

Acumulador de succión. El tanque de almacenamiento que recibe el refrigerante líquido procedente del evaporador, y que impide que fluya a la línea de succión.

Aire acondicionado. El tratamiento que tiene como fin controlar una o más de las siguientes condiciones del aire contenido en un espacio: temperatura, humedad, limpieza y distribución.

Caída de presión. La pérdida de presión a través de una tubería, ducto o dispositivo.

Calor. Una forma de energía que se transfiere debido a la diferencia de temperatura.

Calor de compresión. El incremento de entalpía resultante de la compresión de un gas.

Capacidad de refrigerante. La cantidad de calor removida por el sistema de refrigeración, del medio o del espacio que se debe enfriar.

Carga. La cantidad de refrigerante con que se llena el sistema; o el fluido en un elemento de potencia en una VET.

Carga de refrigerante. La cantidad de captación de calor entregada por el medio y espacio refrigerado, o la cantidad requerida de remoción de calor, de dicho medio o espacio.

Ciclo. Una serie de procesos repetidos que experimenta el refrigerante.

Compresor. Una máquina que eleva la presión de un gas.

Compresor hermético. Una combinación de compresor y motor dentro de una carcasa sellada y soldada, que no se puede abrir para efectuar reparaciones en el campo.

Condensación. El proceso que cambia de estado de gas a líquido, mediante la extracción de calor.

Control. Regulación del equipo para mantener una condición deseada.

Controlador. Un dispositivo que se utiliza para regular automáticamente el equipo.

Entalpía. La propiedad de una sustancia, que indica la energía almacenada debido a la temperatura y la presión; se le conoce asimismo, como el contenido de calor.

Entropía. La cantidad de calor agregada a una sustancia a la temperatura a la cual es agregado: el cambio refleja la eficiencia en el uso de la energía.

Evaporación. El cambio de estado de líquido a gas.

Filtro de refrigerante. Un dispositivo para remover las partículas presentes en un refrigerante.

Fuerza. Un empuje ejercido por un objeto sobre otro.

Lado de alta. La parte de un sistema de refrigeración que se halla a la temperatura de condensación.

Lado de baja. La parte de un sistema de refrigeración, que se halla a la presión de evaporación.

Potencia. La realización de un trabajo o energía en la unidad de tiempo.

Recibidor. Un recipiente para almacenar líquido refrigerante.

Refrigerante. Un fluido que se utiliza para producir un efecto de enfriamiento.

Temperatura. La medida de la actividad térmica de la materia; la medida de la actividad molecular.

Tonelada de refrigeración. Una unidad que mide la cantidad de energía térmica. Se utiliza en la refrigeración y equivale a 12.000 Btu/hr.

Tubo capilar. Un tubo de pequeño diámetro utilizado como dispositivo de control de flujo de refrigerante o para transmitir la presión desde el bulbo de un control de temperatura.

Válvula solenoide. Una válvula de operación electromagnética.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA VÁLVULA DE EXPANSIÓN DE FLUJO DE REFRIGERANTE CON CONTROL ELECTRÓNICO*

AUTORES:

JOSÉ PABLO PÁEZ MARTÍNEZ.
ALFREDO CRISTÓBAL OSORIO GARCÍA**

PALABRAS CLAVES:

Bulbo, expansión, sobrecalentamiento, sistema sensor.

DESCRIPCIÓN:

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor son la tecnología más ampliamente usada para lograr la refrigeración. Estos sistemas emplean cuatro elementos básicos que son: Compresor, condensador, evaporador y la válvula de expansión termostática, siendo esta última un dispositivo de control de flujo que tiene como funciones principales regular el flujo de refrigerante líquido que alimenta al evaporador y crear una caída de presión produciendo la expansión del refrigerante. Garantiza además un sobrecalentamiento constante a la salida del evaporador para evitar la llegada del líquido al compresor.

Se diseñó a partir de una válvula de expansión termostática, una válvula con control electrónico mediante un sistema sensor basado en las termocuplas para la medición del grado de sobrecalentamiento y un mecanismo de calentamiento-enfriamiento del bulbo por medio del aire donde su funcionamiento es regulado de acuerdo a las necesidades de operación del sistema, el cual es monitoreado a través del software LabVIEW.

Como resultado de la investigación y mediante la toma de datos en el banco para pruebas de refrigeración se encontró que el comportamiento del grado de sobrecalentamiento de la válvula de expansión con control electrónico fue inferior al comportamiento de la válvula de expansión termostática convencional dentro de los rangos de capacidad nominal del sistema, pero cumple con los requerimientos básicos para su funcionamiento en un sistema de refrigeración. Se propone en consecuencia investigar sobre la aplicabilidad de otro tipo de válvula de control electrónico activadas ya sea por motor paso a paso o servomotor.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Armando Gelvez Arocha.

SUMMARY

TITLE

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A EXPANSION VALVE OF COOLANT FLOW WITH ELECTRONIC CONTROL *

AUTHORS

JOSÉ PABLO PÁEZ MARTÍNEZ.
ALFREDO CRISTÓBAL OSORIO GARCÍA**

KEY WORD

Bulbo, expansion, overheat, sensor system.

DESCRIPTION

The compression of steam refrigeration systems is the technology more widely used to obtain the refrigeration. These systems use four basic elements that are: Compressor, condenser, evaporator and the thermostatic expansion valve; this last is a flow control device that has these main functions: Flow regulation of the coolant liquid that feeds the evaporator and create a pressure fall producing the expansion of the coolant. It also guarantees a constant overheat in the outflow of the evaporator to avoid the arrival of liquid to the compressor.

It was designed from a thermostatic expansion valve, a valve with electronic control by means of a sensor system based on termocuplas, for overheat degree measurement, and a mechanism of heating-cooling of the trough the air where its operation are regulated according to the system operation needs, which is watch through software LabVIEW.

As result of the investigation and by gathering data in the bank for refrigeration tests, we find out that the behavior of the degree of overheat expansion valve with electronic control was lower to the behavior of the conventional thermostatic expansion valve in to the ranks of system nominal capacity, but fulfills the basic requirements for its operation in a refrigeration system. Consequently it is proposed to investigate the applicability of another type of valve of electronic control activated with step by step motor or servomotors.

* Degree Proyect

** Physical-mechanical Engineer Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Omar Armando Gelvez Arocha

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la industria de la refrigeración constituye un sector importante y esencial de cualquier sociedad tecnológica, desde la refrigeración doméstica, comercial e industrial hasta acondicionar el aire para el confort de las personas, por ello es importante hacer énfasis en el aprovechamiento y ahorro de energía en los sistemas de refrigeración.

El proyecto contempla el análisis de alternativas de solución para disminuir el consumo de potencia, evitar el sobrecalentamiento y sobrealimentación en un sistema de refrigeración.

Mediante pruebas e investigaciones para el diseño de una válvula de control electrónico a partir de una válvula de expansión termostática, se hizo un análisis del problema planteado y se buscaron alternativas de solución.

En el desarrollo del mismo, se tomará la mejor alternativa, y se implemento un sistema de control para esta solución. Esto incluye la selección de la instrumentación, el hardware, la estrategia de control y optimización del cuarto frío.

Una vez implementada la condición de operación de la válvula de expansión termostática con control electrónico, permitió obtener un sistema de refrigeración estable, ante las variaciones de carga, también varía el consumo de energía si la condición de operación es menos exigente obteniendo como resultado un ahorro energético, el cual finalmente es un beneficio económico.

2. GENERALIDADES DE REFRIGERACIÓN

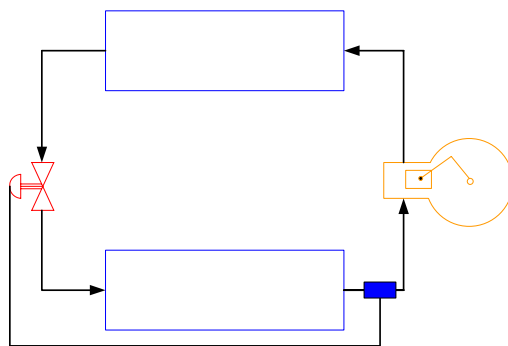
La refrigeración es un proceso por el que se reduce la temperatura de un espacio determinado y se mantiene esta temperatura baja con el fin, por ejemplo, de enfriar alimentos, conservar determinadas sustancias o conseguir un ambiente agradable. El almacenamiento refrigerado de alimentos perecederos, productos farmacéuticos y otros se conoce como almacenamiento en frío. La refrigeración evita el crecimiento de bacterias e impide algunas reacciones químicas no deseadas que pueden tener lugar a temperatura ambiente.

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor emplean cuatro elementos básicos los cuales son: Compresor, condensador, evaporador y la válvula de expansión.

2.1. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

La figura 1. Representa el esquema de un sistema de refrigeración de compresión mecánica y sus principales componentes; encontramos en ella:

Figura 1. Componentes de un sistema de refrigeración



Fuente: Autor

2.1.1 Compresor. Su finalidad, es la de aspirar los vapores producidos por la evaporación del refrigerante en el evaporador a una presión baja, correspondiente a las condiciones de funcionamiento, y descargar a alta presión estos vapores comprimidos en el condensador, a fin de permitir su condensación por enfriamiento.

2.1.2 Condensador. Intercambiador de calor de tubos aleteados similar al evaporador, que sirve para transmitir al medio de enfriamiento (aire o agua) el calor contenido en los vapores descargados por el compresor.

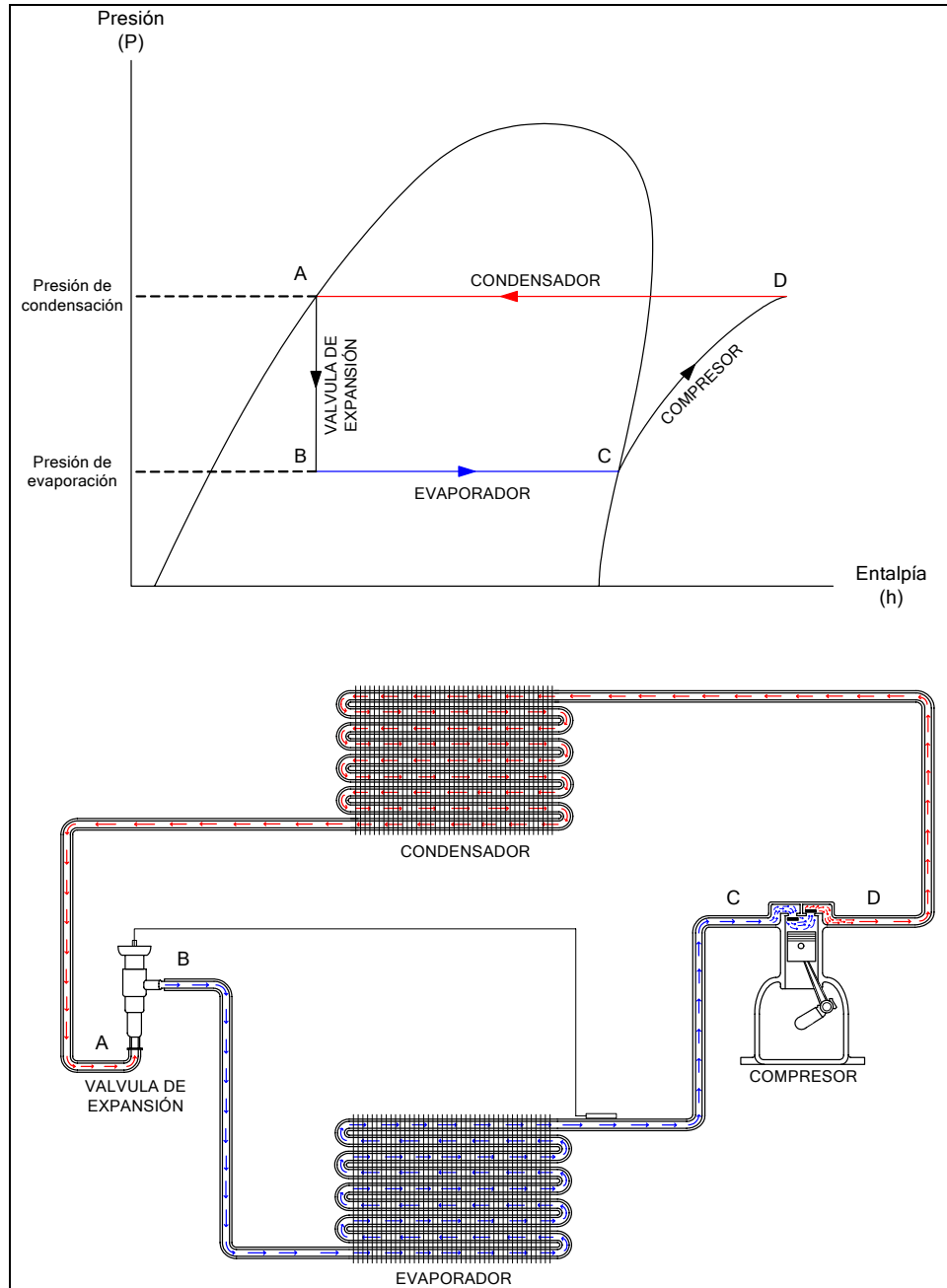
2.1.3 Válvula de expansión. Es un aparato que tiene por objeto inyectar al evaporador la cantidad justa y necesaria de refrigerante para absorber la aportación de calor procedente del medio a enfriar.

2.1.4 El evaporador. Tiene como objetivo proveer una transferencia continua y eficiente de calor desde el medio que se desea enfriar al fluido refrigerante. El medio que se desea enfriar puede ser un gas, un líquido, o un sólido, en los evaporadores más comunes el refrigerante fluye por los tubos, mientras que el aire a enfriar fluye por el exterior de los mismos. A estos tubos, construidos a menudo en forma de serpentines se les llama transferencia de calor. Existen muchas disposiciones y construcciones de evaporadores pero el método de transferencia de calor es el mismo en todos ellos.

2.2. CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

El ciclo que se describe es idealmente teórico como se muestra en el diagrama $p-h$ (figura 2), además nos da un esquema correspondiente al sistema, el cual indica la ubicación de cada proceso.

Figura 2. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor



Fuente: Alarcon Jose. Tratado practico de refrigeracion automatica. 12ª Edicion. Pag 15

2.2.1 Proceso en el dispositivo de control de flujo. En el punto A (figura 2) representa la condición del refrigerante que sale del condensador y entra al dispositivo de control de flujo como un líquido saturado a la temperatura de condensación. Cuando el refrigerante fluye a través de la restricción en el

dispositivo de control de flujo, su presión cae súbitamente hasta la presión del lado de baja, en B. A este proceso se le llama *expansión*, y es un proceso a entalpía constante.

2.2.2 Proceso en el evaporador. El refrigerante líquido en el evaporador se encuentra en estado saturado, el calor adquirido hace que se evapore cuando fluye por el evaporador. Este es un proceso a presión constante (línea B-C), donde el refrigerante gana calor y aumenta su entalpía, el refrigerante sale del evaporador como un vapor saturado (punto C, figura 2), en el ciclo ideal.

2.2.3 Proceso en el compresor. Este es un proceso a entropía constante (isentrópico). El punto C (figura 2), que corresponde a la condición de la entrada del compresor, la presión de descarga, a la salida del compresor, es la presión de condensación (punto D), donde se localiza en la intersección de las líneas de entropía constante y de presión de condensación.

2.2.4 Proceso en el condensador. En este proceso se remueve calor del vapor refrigerante sobrecalentado (punto D, figura 2) que entra al condensador, para primero reducir su temperatura al punto de saturación, y luego condensarlo. El refrigerante sale del condensador como un líquido saturado (punto A), por tanto se hace una remoción de calor a la presión del lado de alta (de condensación). El refrigerante ha completado un ciclo, y se halla en las mismas condiciones que cuando se inició el análisis.

3. LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN Y SUS COMPONENTES

3.1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de este proyecto es desarrollar una Válvula de Expansión Electrónica (V.E.E) no convencional a partir de una Válvula de Expansión Termostática (V.E.T) mediante la adaptación de sus mecanismos externos que permita el funcionamiento automático a través del control electrónico para finalmente probarla en el banco para pruebas de refrigeración.

Esta tecnología ya existe en la industria brindando resultados satisfactorios para los sistemas de refrigeración pero a un alto costo que justifica el buscar alternativas que mediante la adaptación de un control electrónico puedan regular el flujo a un costo menos elevado.

El cuarto frío está ubicado en el laboratorio de Plantas Térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS y pertenece al Laboratorio de la asignatura de Refrigeración y Aire Acondicionado.

Los diferentes elementos que constituyen el circuito de refrigeración, se mencionan a continuación (ver tabla 1) con una clasificación por grupos como son:

Tabla 1. Aparatos Que Conforman el Sistema de Refrigeración.

<p>APARATOS PRINCIPALES</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Compresor - Condensador - Válvula de expansion - Evaporador - Válvula de expansion con control electronico
<p>APARATOS ANEXOS</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Filtro - Recipiente acumulador refrigerante - Recipiente acumulador vapor - Recipiente acumulador de aceite - Motor -ventilador
<p>APARATOS DE AUTOMATIZACION</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Aparatos de puesta en marcha: contactores, reles, válvula - Aparatos de alimentación: válvulas de expansion termostaticas, V.E.T. con control electronico, válvulas solenoides. - Aparatos de regulación: presostato, transformador - Aparato de proteccion: presostato, rele termico, transistor amortiguador de vibraciones - Aparatos de señalización: amperímetro, voltímetro, visores, termocuplas

Fuente: Autor

3.2 COMPONENTES MECÁNICOS DEL CUARTO FRÍO

El laboratorio de refrigeración y aire acondicionado está conformado por los siguientes componentes mecánicos.

3.2.1 Cámara de enfriamiento. La cámara de enfriamiento (figura 3) se construye de acuerdo a las necesidades de cada aplicación, como la temperatura dentro del cuarto, el tipo de producto y la forma de almacenamiento.

La cámara de enfriamiento es del tipo desmontable modular con 4" de poliuretano de espesor como aislante. Los módulos están contruidos con marco en madera y cubiertos con lámina galvanizada calibre 22 y la puerta cubierta con lámina de acero inoxidable calibre 22. El techo se encuentra construido en un solo módulo lo mismo que el piso.

Figura 3. Cámara de enfriamiento.



Fuente: Autor

Datos de la cámara de enfriamiento:

- Material aislante = poliuretano ($k = 0.17 \frac{Btu}{F * ft}$)
- Espesor de las paredes del aislante = 4 in (0.33 ft)
- Alto = 2075 mm (6.8 ft)
- Ancho = 1180 mm (3.87 ft)
- Largo = 2110 mm (6.9 ft)
- Área de transferencia por pared = 170.33 ft²
- Volumen interno = 122 ft³ = 3.45 m³

- Material de los módulos = lámina galvanizada calibre 22.

3.2.2 Compresor

Figura 4. Motocompresor hermético



Fuente: Autor

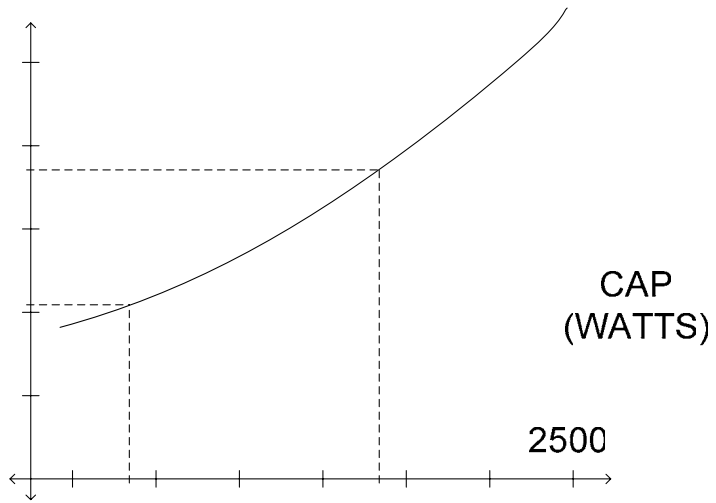
Características técnicas:

Tabla 2. Ficha técnica motocompresor

TIPO	HERMÉTICO
MARCA	COPELAND
NÚMERO DE MODELO	CS12K6ETF5
POTENCIA	2 H.P.
CAPACIDAD (Nominal)	11700 BTU/H
VOLTAJE	200/230 VOLTIOS
FASES	3
REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
LUBRICANTE SINTÉTICO	POLYOL ESTER
MARCA DEL LUBRICANTE	KRUNER
REFERENCIA DEL LUBRICANTE	RL 32
CANTIDAD DEL LUBRICANTE	2 LITROS
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE SUCCIÓN	5/8"
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE DESCARGA	1/2"

Fuente: Autor del Proyecto

Gráfica 1. Capacidad del compresor vs Temperatura de evaporación



Fuente: Autor

3.2.3 Evaporador

Figura 5. Evaporador



Fuente: Autor

Características técnicas:

-25 (-23,3) -20 -1

Tabla 3. Características técnicas del evaporador.

TIPO	ALETEADO
MODELO	E20LE-300
NUMERO DE MOTORES	1
POTENCIA	2 H.P.
VOLTAJE	200/230 VOLTIOS
TEMPERATURA DE VAPORIZACIÓN	20 F
CAPACIDAD	6000 BTU/H
REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
DIÁMETRO DE TUBERÍA	1/2"
NÚMERO DE ALETAS	124
NÚMERO DE TUBOS	60
AREA INTERNA DE TRANSFERENCIA	1130 pulg ²
AREA TOTAL EXTERNA DE TRANFERENCIA	40578 pulg ²
NUMERO DE CIRCUITOS	3
AREA INTERNA POR CADA CIRCUITO	503 pulg ²
DISTRIBUCIÓN DE TUBOS	Arreglo triangular a 30°

Fuente: Autor

3.2.4 Condensador

Figura 6. Condensador.



Fuente: Autor

Características técnicas:

Tabla 4. Características técnicas del condensador.

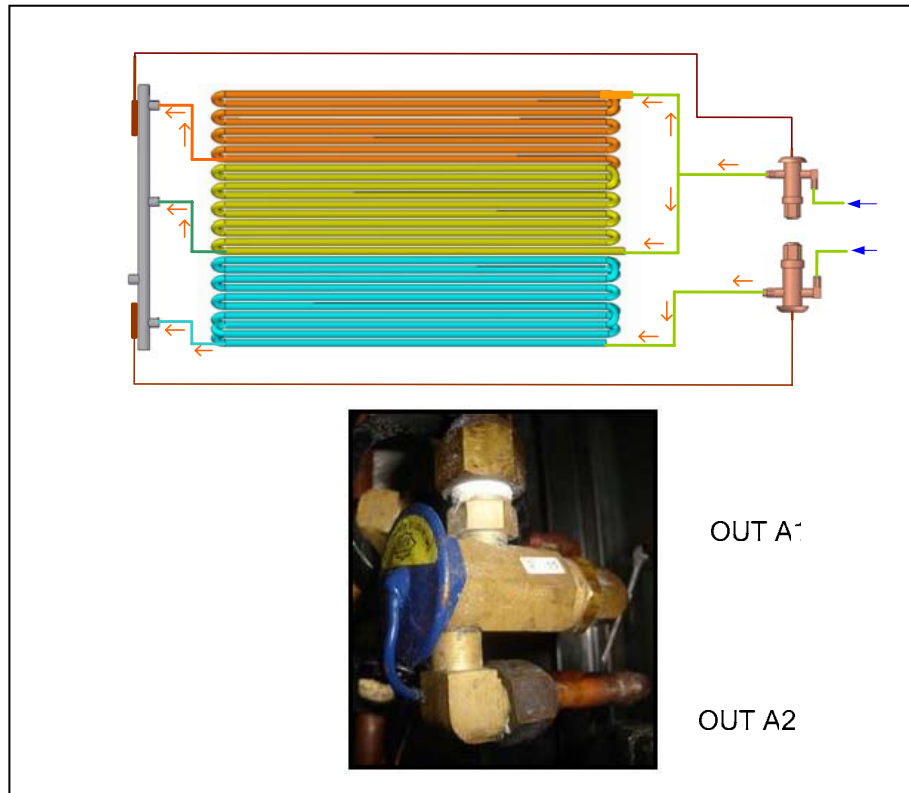
TIPO	ALETEADO
NUMERO DE MOTORES	1
POTENCIA	½ H.P.
VOLTAJE	200/230 VOLTIOS
TEMPERATURA DE CONDENSACIÓN	26 °C
CAPACIDAD	6000 BTU/H
REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
DIÁMETRO DE TUBERÍA	1/2"
NÚMERO DE ALETAS	132
NÚMERO DE TUBOS	54
AREA INTERNA DE TRANSFERENCIA	1282 pulg ²
AREA TOTAL EXTERNA DE TRANSFERENCIA	14460 pulg ²
DISTRIBUCIÓN DE TUBOS	Arreglo triangular a 30°

Fuente: Autor

3.2.5 Sistema de regulación de flujo de refrigerante. El sistema se compone de tres válvulas de expansión termostáticas

3.2.5.1. Válvulas de expansión termostáticas. Funcionan con refrigerante 134a. Se utilizan dos (V.E.T._A y V.E.T._B) debido al circuito bifurcado presente en el evaporador compuesto empleado como lo muestra la figura 7. A la salida de la V.E.T._A se divide en dos ramificaciones para alimentar de refrigerante la mayor parte del evaporador, y para la V.E.T._B solo alimenta una tercera parte del evaporador (ver figura 7).

Figura 7. Válvula de expansión termostática y su ubicación en el circuito de refrigeración



Evaporador

Fuente: Autor

Características técnicas:

OUT B

Tabla 5. Características técnicas de las válvulas de expansión termostáticas

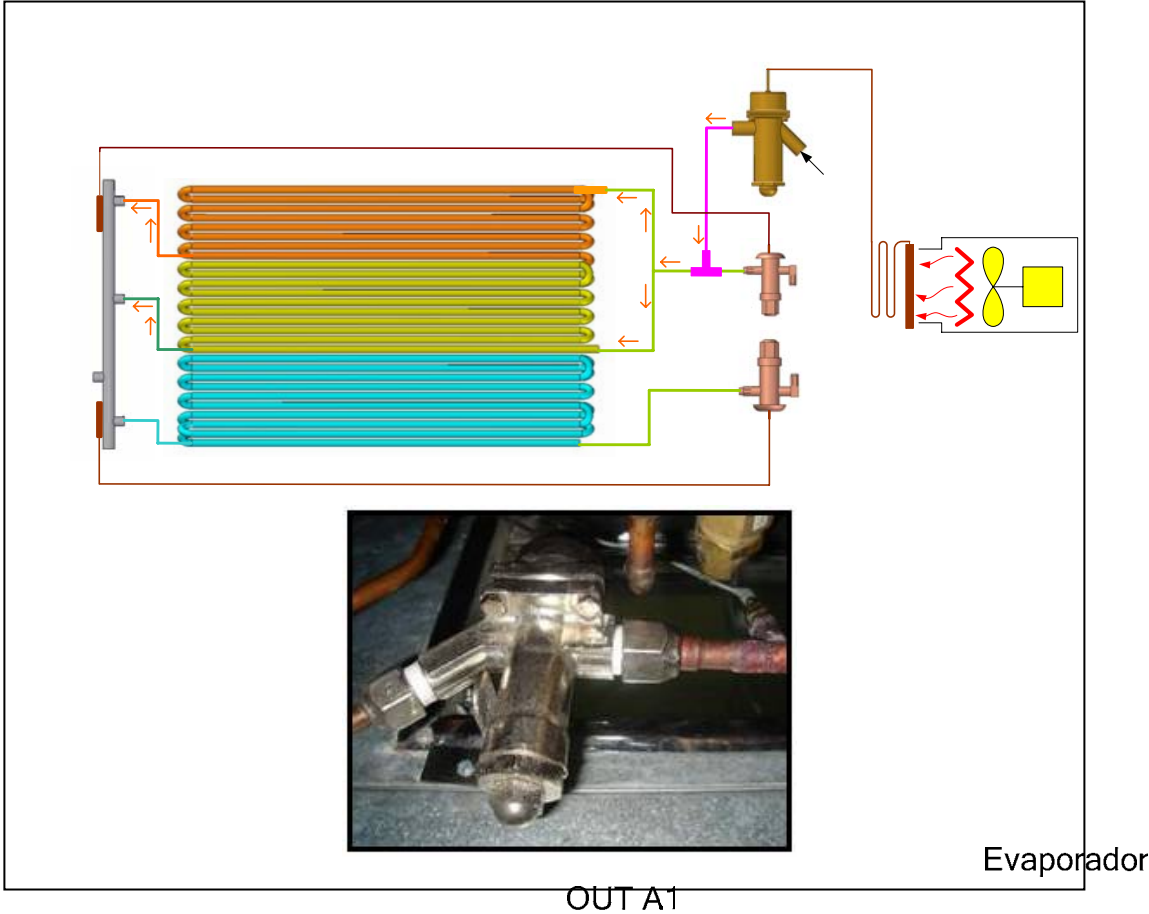
REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
CAPACIDAD	1/2 Tonelada
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE ENTRADA	3/8"
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE SALIDA	1/2"

Fuente: Autor

3.2.5.2 Válvula de expansión termostática con control electrónico. La válvula de expansión termostática con control electrónico se instaló de tal forma que alimentara de flujo de refrigerante la mayor parte del evaporador como lo muestra

la figura 8. Esta válvula es activada por medio de un mecanismo de calentamiento-enfriamiento externo que a su vez controla el grado de sobrecalentamiento requerido de forma automática.

Figura 8. Válvula de expansión termostática con control electrónico



Fuente: Autor

Características técnicas:

OUT A2

OUT B

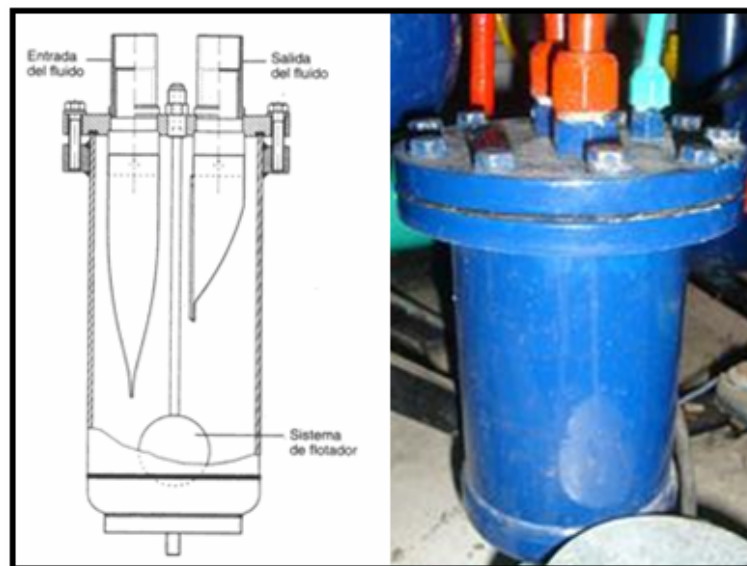
Tabla 6. Características técnicas válvula de expansión termostática con control electrónico

REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
CAPACIDAD	1 Tonelada
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE ENTRADA	3/8"
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE SALIDA	1/2"

Fuente: Autor

3.2.6 Separador de aceite. El separador de Aceite (ver figura 9) es usado para aislar el aceite mezclado (aceite sintético y refrigerante 134a) del refrigerante a la salida del compresor. Este aceite es devuelto al compresor por una línea de retorno del aceite que llega a la parte baja del compresor, la ausencia del separador de aceite genera acumulación de lodos en el condensador lo que implica una mayor caída de presión y por lo tanto una pérdida de eficiencia en el sistema.

Figura 9. Separador de aceite



Fuente: P.J. RAPIN/P. JACQUARD. Instalaciones Frigoríficas. Tomo 2. pág. 280

Foto: Autores del proyecto

Características técnicas:

Tabla 7. Características técnicas separador de aceite

REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE RETORNO	1/4"
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE ENTRADA	1/2"
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE SALIDA	1/2"

Fuente: Autor

3.2.7 Recipiente de succión. El recipiente de succión (ver figura 10) está construido con el fin de llevar el refrigerante hacia el compresor y garantizar la succión de solo vapor de refrigerante y asegurar la estanqueidad de los lodos dentro del recipiente. Para evitar que las vibraciones producidas por el motocompresor afecten la tubería de succión se utiliza un tramo de tubería metálico flexible para unir el recipiente de succión con el motocompresor.

Figura 10. Recipiente de succión



Fuente: Autor

Características técnicas:

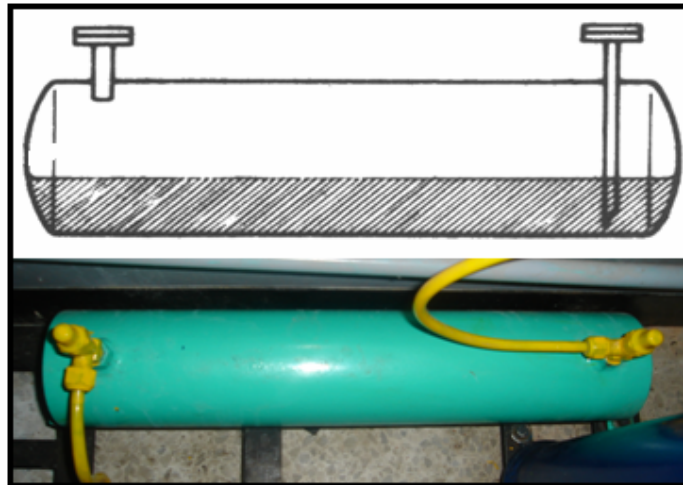
Tabla 8. Características técnicas recipiente de succión

REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE ENTRADA	5/8"
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE SALIDA	5/8"

Fuente: Autor

3.2.8 Recipiente de líquido de refrigerante. Los recipientes de líquido (ver figura 11) reciben el refrigerante líquido que viene del condensador. Estos depósitos tienen las dimensiones que les permitan contener la mayor parte de la carga de fluido de la instalación, y están provistos siempre de una válvula de salida del líquido con un tubo sumergido, que asegura la alimentación de líquido.

Figura 11. Recipiente de líquido de refrigerante



Fuente: P.J. RAPIN/P. JACQUARD. Instalaciones Frigoríficas. Tomo 2.

Características técnicas:

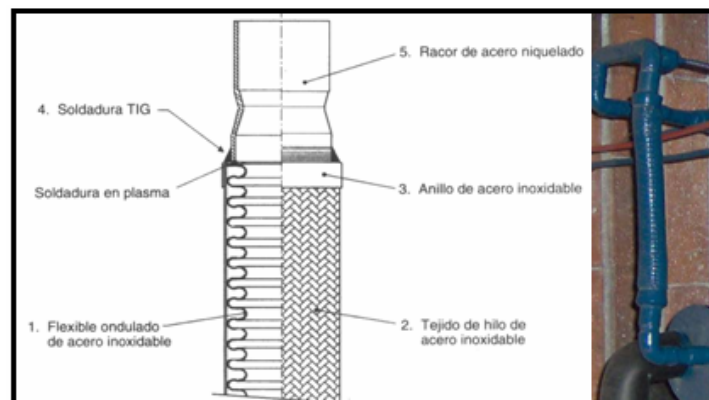
Tabla 9. Características técnicas recipiente de líquido de refrigerante

REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE ENTRADA	1/2"
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE SALIDA	1/2"

Fuente: Autor

3.2.9 Amortiguador de vibraciones. El amortiguador de vibraciones (ver figura 12) está formado por un tubo metálico flexible de acero inoxidable cuyas ondas paralelas se extienden en un tubo soldado de extremo a extremo.

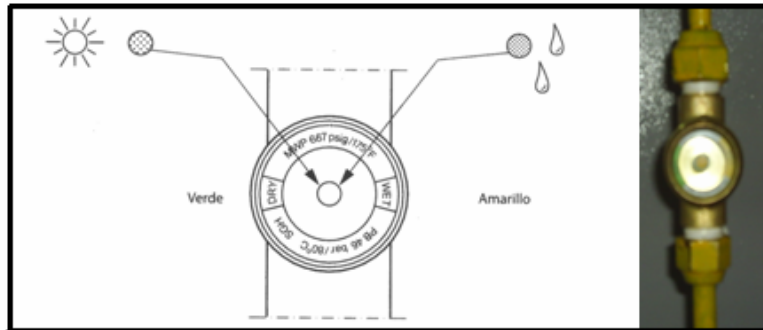
Figura 12. Amortiguador de vibraciones



Fuente: P. J. RAPIN Formulario del frío. pág. 283

3.2.10 Visor. Contiene en el cárter un visor de cristal (figura 13) que permite vigilar desde el exterior ver una indicación del nivel de refrigerante líquido. Está dotado de un disco sensible que, por el cambio de color, señala la presencia de humedad en el sistema, intercalándose en la línea de líquido (ver tabla 10).

Figura 13. Visor



Fuente: Catalogo de Danfoss

Tabla 10. Determinación de la humedad del sistema por medio del visor.

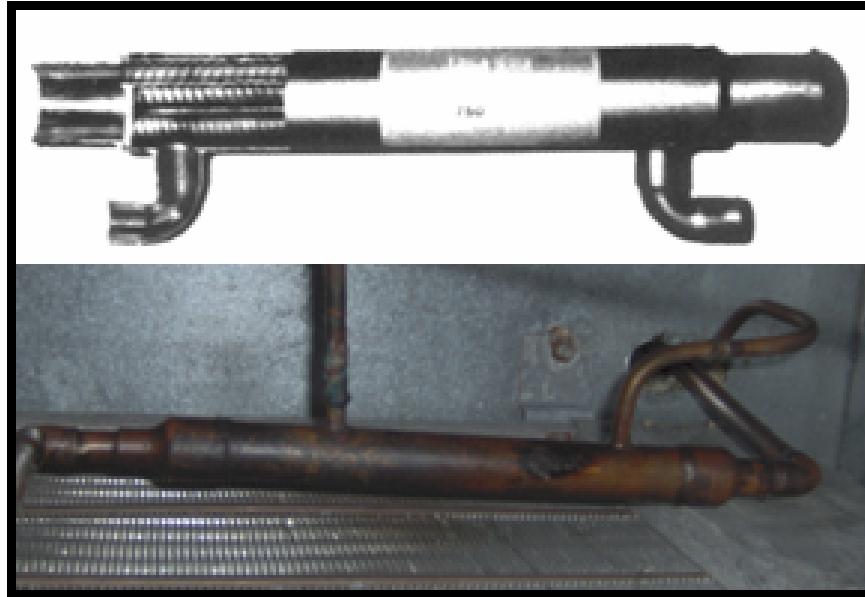
	PPM* con temperatura del líquido = 25°C			PPM* con temperatura del líquido = 43°C		
	Verde	Verde/Amarillo	Amarillo	Verde	Verde/Amarillo	Amarillo
R134a	<30	30-100	>100	<45	45-170	>170
R404A	<20	20-70	>70	<25	25 - 100	>100
R507	<15	15-60	>60	<30	30-110	>110
R407C	<30	30-140	>140	<60	60-225	>225

*PPM=partes por millón (~humedad absoluta), verde=seco, amarillo=húmedo

Fuente: Catalogo de Danfoss

3.2.11 Intercambiador de calor. El intercambiador de calor (ver figura 14) permite la mejora del rendimiento del cuarto frío al subenfriar el líquido que admite la válvula de expansión. Por otra parte implica que el sobrecalentamiento de los vapores que llegan al compresor sea más importante.

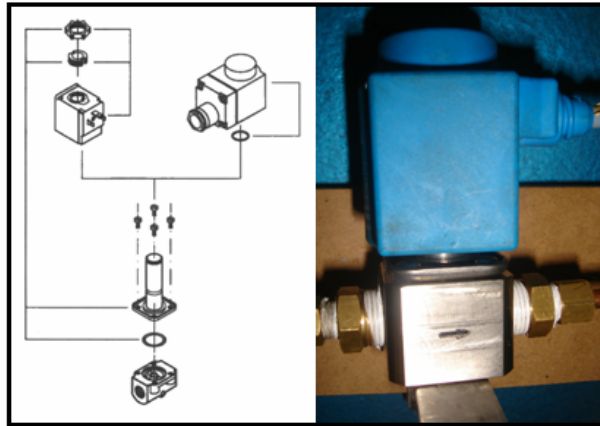
Figura 14. Intercambiador de calor



Fuente: formulario del frío. Pág. 142

3.2.12 Válvula solenoide. La válvula solenoide (ver figura 15) funciona siguiendo un principio magnético. Una bobina de excitación va montada sobre un tubo estanco no magnético el cual se mueve libremente una válvula conectada a un núcleo de hierro dulce, asegurando de esta forma la maniobra de la válvula. La instalación es antes de las válvulas de expansión que controlan la alimentación de refrigerante líquido a las secciones correspondientes del evaporador. En el cuarto frío se encuentran instaladas 3 válvulas solenoides de la siguiente forma: 2 válvulas solenoides que permiten el paso de refrigerante al sistema normal y una válvula solenoide para la activación del circuito de la válvula de expansión electrónica (V.E.E.).

Figura 15. Válvula Solenoide



Fuente: Autor

Características técnicas:

Tabla 11. Características técnicas válvula solenoide

REFRIGERANTE UTILIZADO	134a
VOLTAJE	110 Voltios
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE ENTRADA	3/8"
DIÁMETRO DE TUBERÍA DE SALIDA	3/8"

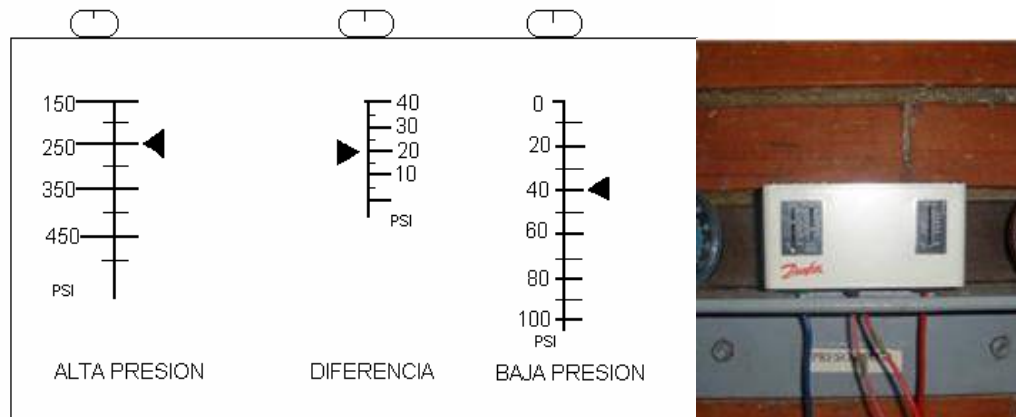
Fuente: Autor

3.2.13 Presostato. Es un interruptor eléctrico (ver figura 16) accionado por presión, que se instala en los sistemas de refrigeración para controlar la presión de alta y baja en las líneas por donde circula el refrigerante, garantizando el funcionamiento correcto del sistema. Este tipo de control se caracteriza por ser de tipo ON- OFF; en el laboratorio encontramos un presostato de ON-OFF dual, que nos permite variar los límites o las referencias para las presiones de alta y de baja.

El funcionamiento para la línea de alta consiste en señalar en la escala de presiones el valor en el cual deberá apagarse el compresor. En la línea de baja se

tienen dos escalas, en la escala 3; se establece la presión a la cual el presostato volverá a accionar el funcionamiento del compresor y en la 2 nos permitirá establecer la diferencia o caída de presión que implícitamente nos indica la presión a la cual el compresor se apagará.

Figura 16. Presostato



Fuente: Autor

Características técnicas:

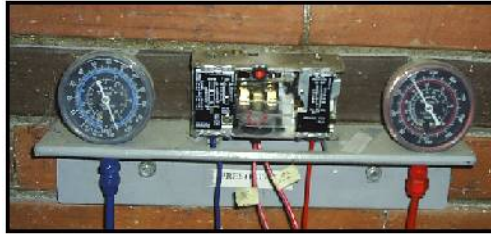
Tabla 12. Características técnicas presostato

PRESIÓN DE DESCARGA	100 A 400 PSI
PRESIÓN DE SECCIÓN	0 A 100 PSI
DIFERENCIA DE SUCCIÓN	10 A 50 PSI

Fuente: Autor

3.2.14 Manómetros. El manómetro (ver figura 17) es un instrumento utilizado para la medición de la presión en los fluidos, el manómetro de baja es de color azul y el de alta es de color rojo. Cada manómetro tiene dos escalas de presión psi y bar. Los dos manómetros son compatibles con R134a.

Figura 17. Manómetros



Fuente: Autor

Características técnicas:

Tabla 13. Características técnicas manómetros

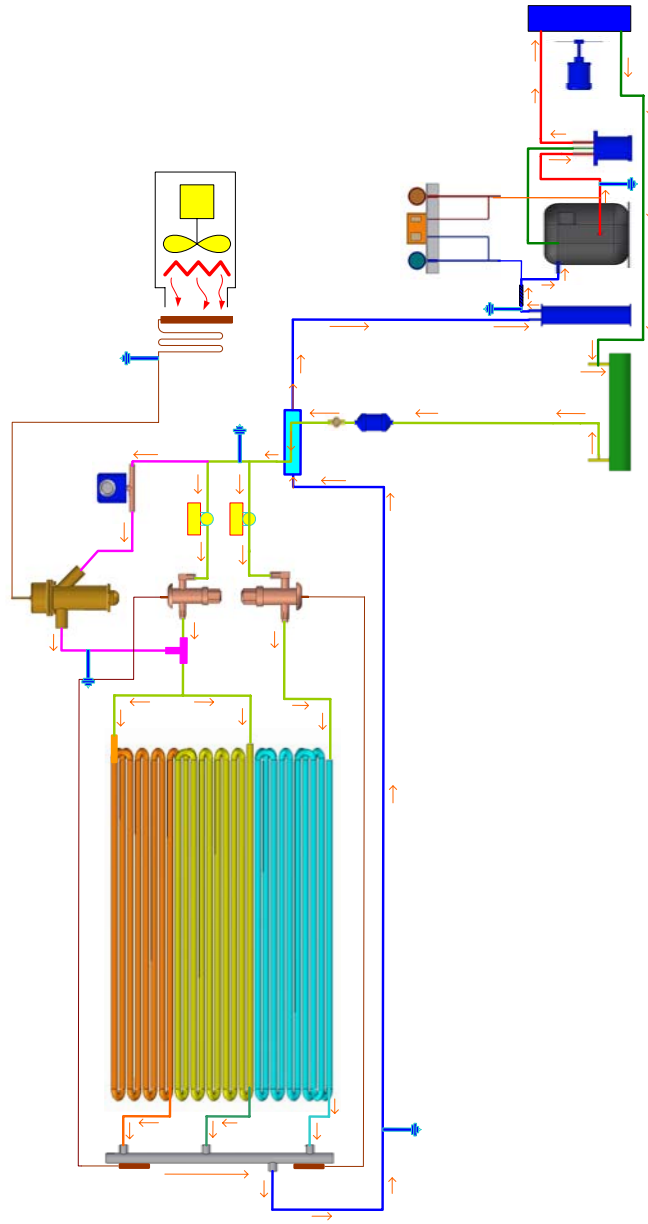
MANÓMETRO DE BAJA	COLOR AZUL
MANÓMETRO DE ALTA	COLOR ROJO
PRESIÓN DE BAJA	-30 VAC A 350 PSI
PRESIÓN DE ALTA	0 A 350 PSI

Fuente: Autor

3.3 ESQUEMA DEL SISTEMA DE REFRIGERACION

La figura 18 ilustra esquemáticamente el sistema de refrigeración del cuarto frío con cada uno de los componentes descritos en la sección anterior, también se muestra la adaptación de la válvula de expansión con control electrónico y su ubicación en el sistema con su respectivo sistema calentamiento-enfriamiento del bulbo.

Figura 18. Esquema del sistema de refrigeración



Fuente: Autor

Alvula termostatica
electronica

Termocupla 7

A1

Solenoid 3

Termocupla 8

Calentamiento enfriamiento
de tiro forzado

Solenoid 1

V.E.T. (A)

Termocupla 6

Bulbo remoto

4. CENTRAL DE POTENCIA, CONTROL Y MONITOREO DEL CUARTO FRÍO

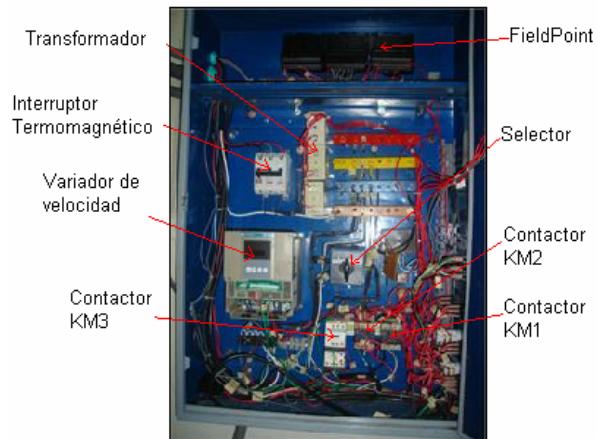
Este capítulo está dedicado particularmente a los esquemas eléctricos y sus dispositivos los cuales más adelante los especificaremos.

4.1 TABLERO DE CONTROL

El tablero de control (figuras 19) es el conjunto de indicadores y dispositivos que controlan de forma automática o manual el funcionamiento del cuarto frío. Está dividido en dos bloques de circuitos:

- Circuito de Potencia con corriente alterna y tres fases (L1, L2 y L3 en VCA).
- Circuito de Control con corriente directa a 14 VCD.

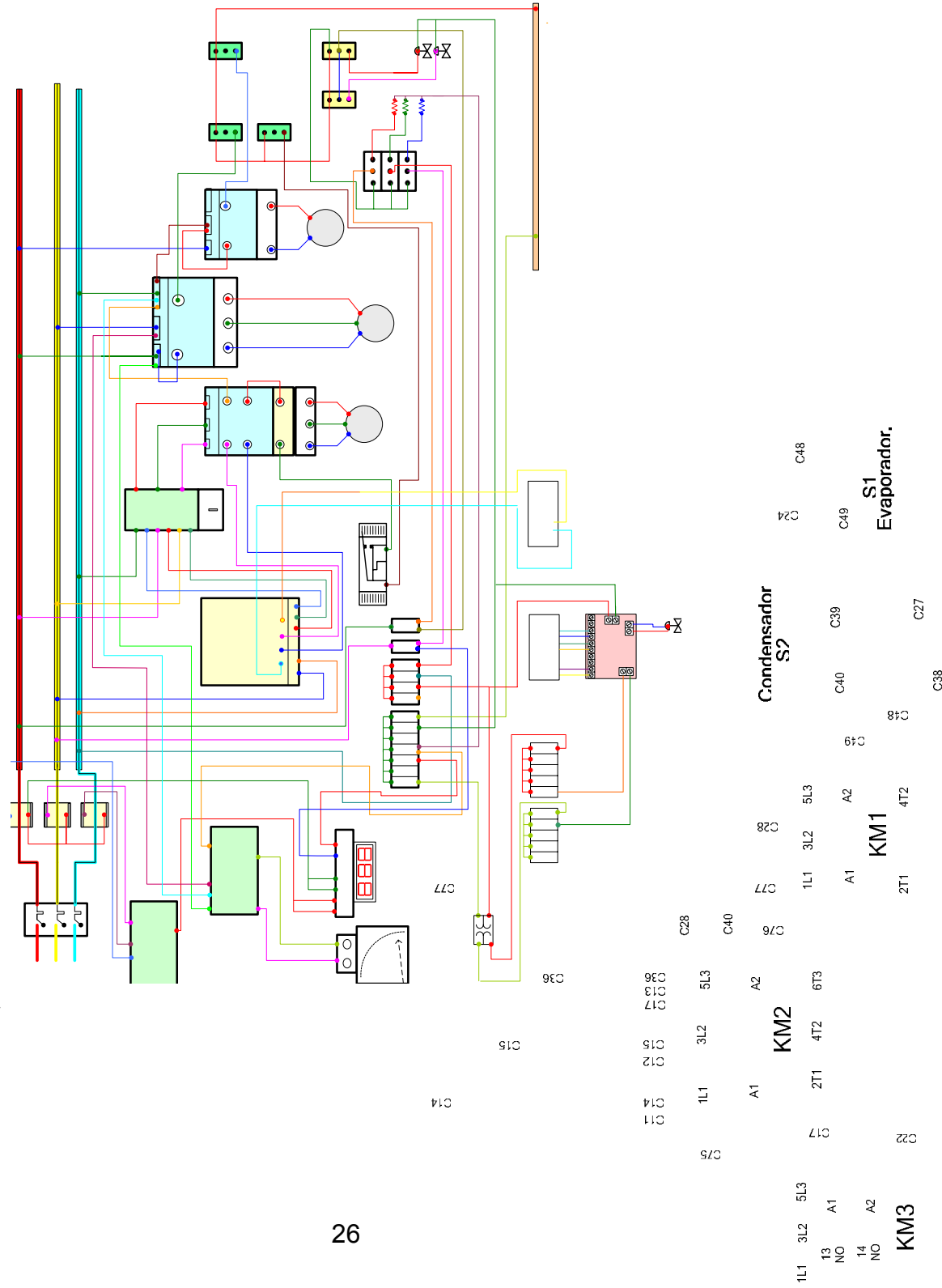
Figura 19. Tablero de control



Fuente: Autor

4.1.1 Esquema general del tablero de control

Figura 20. Esquema general del tablero de control



Fuente: Autor

Este esquema (ver figura 20) representa todos los elementos constitutivos del tablero de control, por consiguiente debe considerarse este esquema como una guía del montaje al servicio de futuros proyectos en el Laboratorio de Refrigeración. Este tablero de control está constituido por los siguientes dispositivos:

4.2 CIRCUITO DE POTENCIA

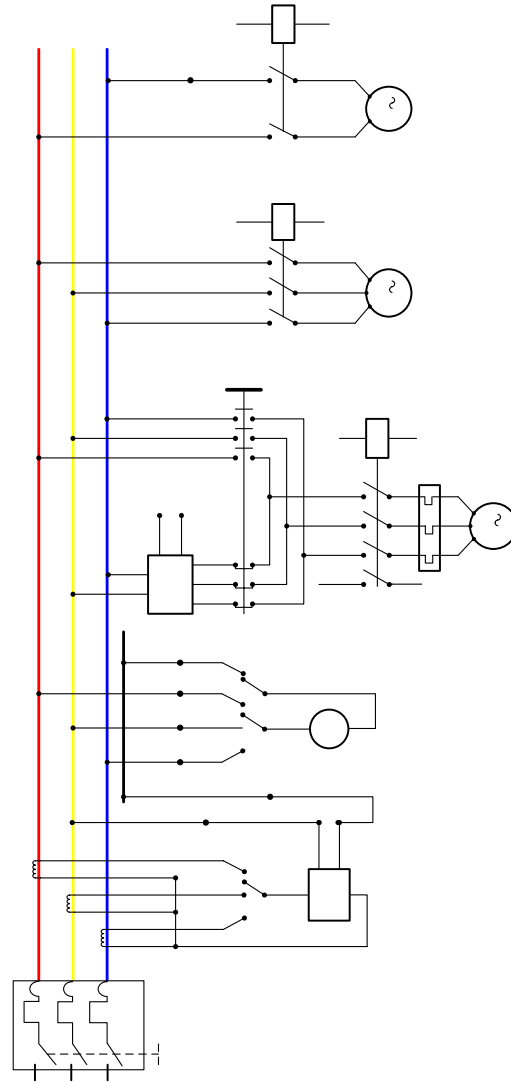
Es el circuito (ver figura 21) que transporta la energía a los aparatos (motores) que la utilizan directamente para el trabajo realizado por la máquina; generalmente, este circuito va unido directamente a la instalación (de baja tensión) de distribución de energía eléctrica local, y contiene los medios para generar, convertir, distribuir o utilizar la energía eléctrica. En el circuito de potencia se energizan los dispositivos eléctricos y electrónicos del tablero de control.

Entre estos dispositivos se encuentran:



4.2.1 Esquema del circuito de control de potencia

Figura 21. Esquema del circuito de control de potencia



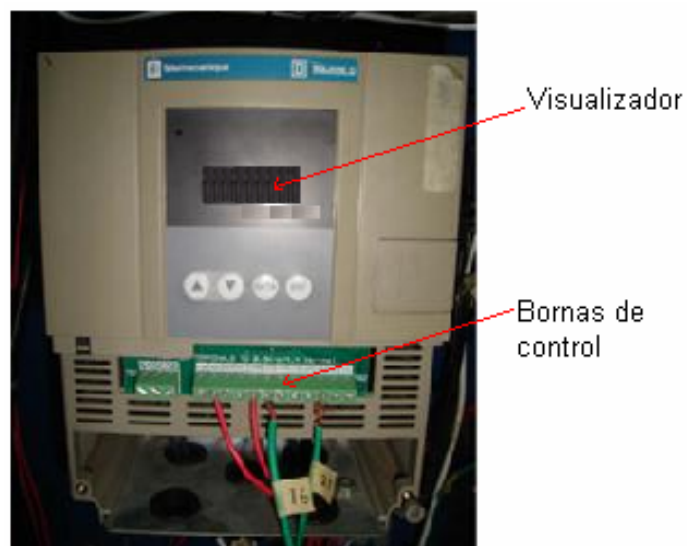
Fuente: Autor

4.2.2 Componentes del circuito de potencia. El tablero de control cuenta con los siguientes dispositivos

C42	L2	10	9
C44	L1	10	9
C44	M	10	9
C21	13	1	2
C16	14	1	2
C30	8	3	2
C32	4	7	3
C31	12	9	3
C75	A1	5L3	3L2
C76	A1	1L1	1L1
C77	C77	11.1	11.1
C36	5L3 (KM2)	3L2	3L2
C28	C28	3L2	3L2
C14	C14	1L1	1L1
C15	C15	3L2	3L2
C36	C36	5L3	5L3

4.2.2.1 Variador de velocidad. Los reguladores de velocidad (ver figura 22) son controles electrónicos para motores, que tienen como fin controlar la velocidad y el par de los motores de corriente alterna convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de la red de distribución de electricidad en magnitudes infinitamente variables.

Figura 22. Variador de velocidad



Fuente: Autor

La finalidad del ALTIVAR 18 es la de variar la velocidad del motor eléctrico que acciona el compresor para mantener una temperatura de refrigerante en el evaporador constante y así poder adaptar el desplazamiento volumétrico del compresor a las condiciones de flujo másico de refrigerante requerido por el sistema.

Tabla 14. Función de las bornas

BORNAS	FUNCIÓN
L1 L2 L3	Alimentación de Potencia
PA PB	Salida hacia la Resistencia de frenado
U V W	Salida hacia El motor

Fuente: Autor

4.2.2.2 Interruptor termomagnético. Es un limitador de corriente (dispositivo electromecánico) que impide sobrepasar la carga. Cuando se origina un exceso de carga, el calor generado abre el dispositivo dejando el suministro de energía suspendido. Protege además las instalaciones de sobrecargas o cortocircuitos (ver figura 23).

Figura 23. Interruptor termomagnético

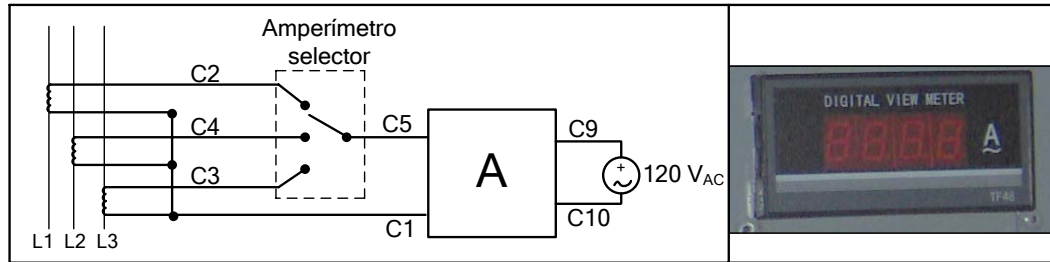


Fuente: Autor

4.2.2.3 Amperímetro digital. Instrumento digital diseñado para medir y presentar en forma digital la corriente eléctrica de un equipo. Este dispositivo (figura 24) se

utiliza para verificar y medir el consumo de corriente del compresor, evaporador, condensador y resistencia eléctrica conectadas a las líneas L1, L2 y L3 (ver tabla 15). El amperímetro digital se encuentra en la parte exterior del tablero de control.

Figura 24. Amperímetro digital



Fuente: Autor

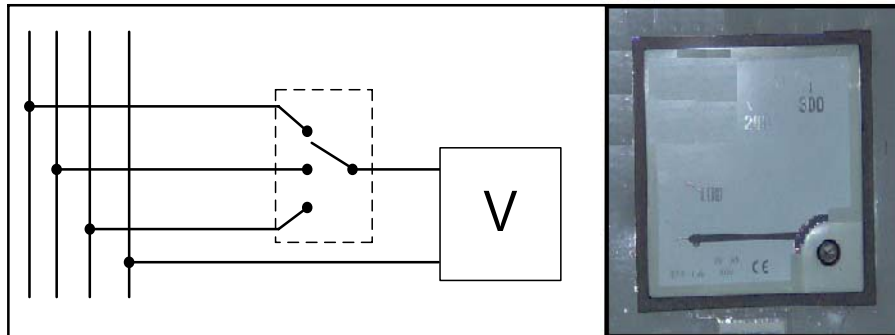
Tabla 15. Conexión de equipos a cada una de las líneas

	L1	L2	L3
Compresor		X	X
Condensador	X	X	
Evaporador	X		
Resistencia	X		

Fuente: Autor

4.2.2.4 Voltímetro análogo. Es un dispositivo formado a partir de un inductor, el cual genera un campo magnético cuando una cierta magnitud de corriente circula a través de él. El inductor o bobina se encuentra instalado dentro de un imán fijo y al combinarse los campos magnéticos de ambos, es cuando se produce el movimiento de una carcasa metálica, que a su vez lleva sobre sí la aguja indicadora que de acuerdo a su movimiento, es el valor de voltaje al que estará apuntando (ver figura 25).

Figura 25. Voltímetro análogo



Fuente: Autor

Voltímetro selector

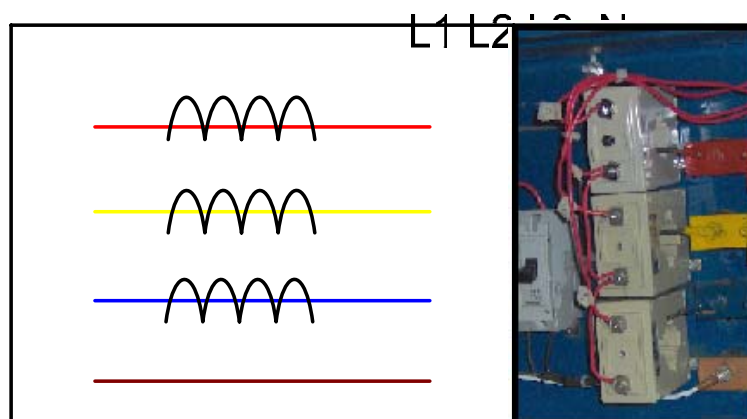
4.2.2.5. Transformador. Dispositivo eléctrico (ver figura 26) que consta de una bobina de cable situada junto a una o varias bobinas más, y que se utiliza para unir dos o más circuitos de corriente alterna (CA) aprovechando el efecto de inducción entre las bobinas. Los transformadores Tr1, Tr2 y Tr3 miden la corriente que se está consumiendo en cada línea de alimentación (L1, L2 y L3).

C11

C12

C13

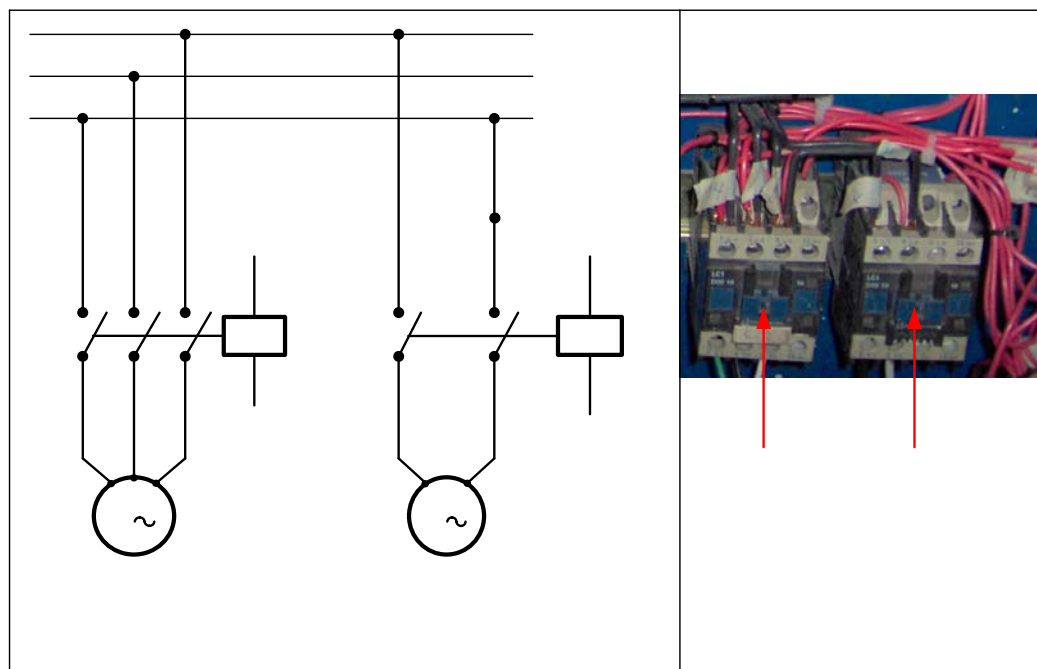
Figura 26. Transformadores



Fuente: Autor

4.2.2.6 Contactores térmicos KM1 y KM2. El contactor es un dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. El contactor KM1 (ver figura 27) es el relé encargado de conmutar el motor del ventilador del evaporador. El contactor KM2 es el relé encargado de conmutar el motor del ventilador del condensador.

Figura 27. Contactores KM1 Y KM2



Fuente: Autor

4.2.2.7 Contactor térmico KM3. El contactor térmico KM3 (ver figura 28) es un elemento de protección únicamente contra sobrecargas, cuyo principio de funcionamiento se basa en la deformación de ciertos elementos (bimetales) bajo el efecto del calor, para accionar, cuando este alcanza ciertos valores, unos

C36
33

C15

C14

A1

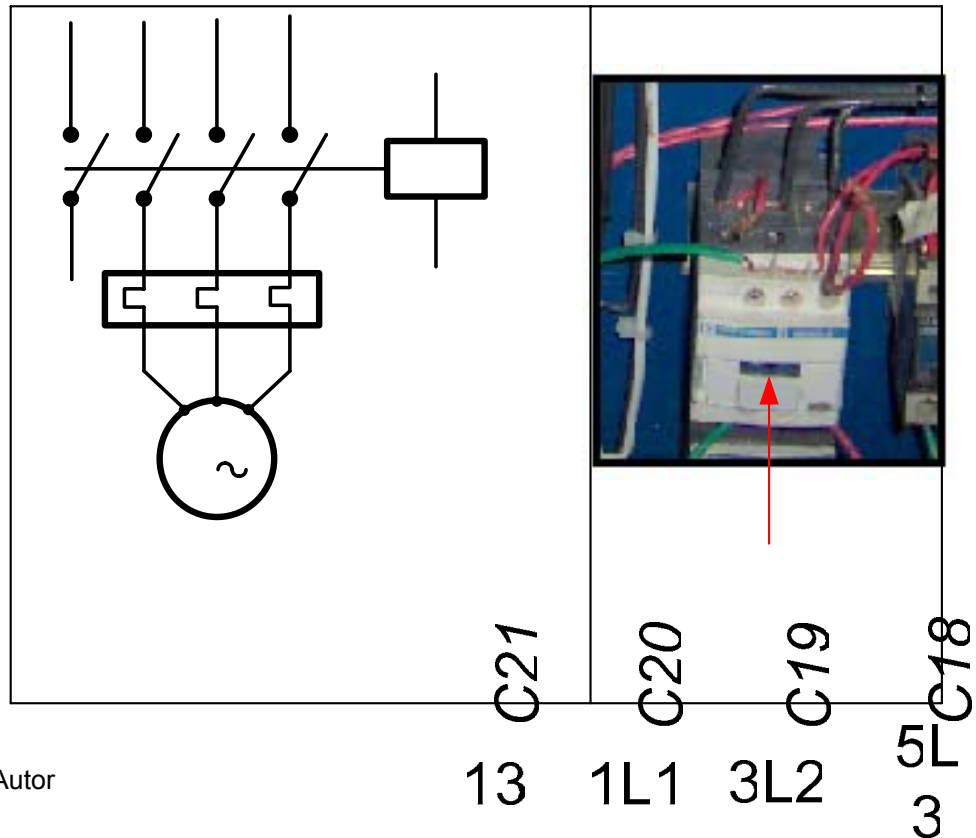
75

C77

(K

contactos auxiliares que desenergicen todo el circuito que en este caso protege al motor del compresor de sobrecargas.

Figura 28. Contactor térmico KM3



Fuente: Autor

4.3 CIRCUITO DE MANDO

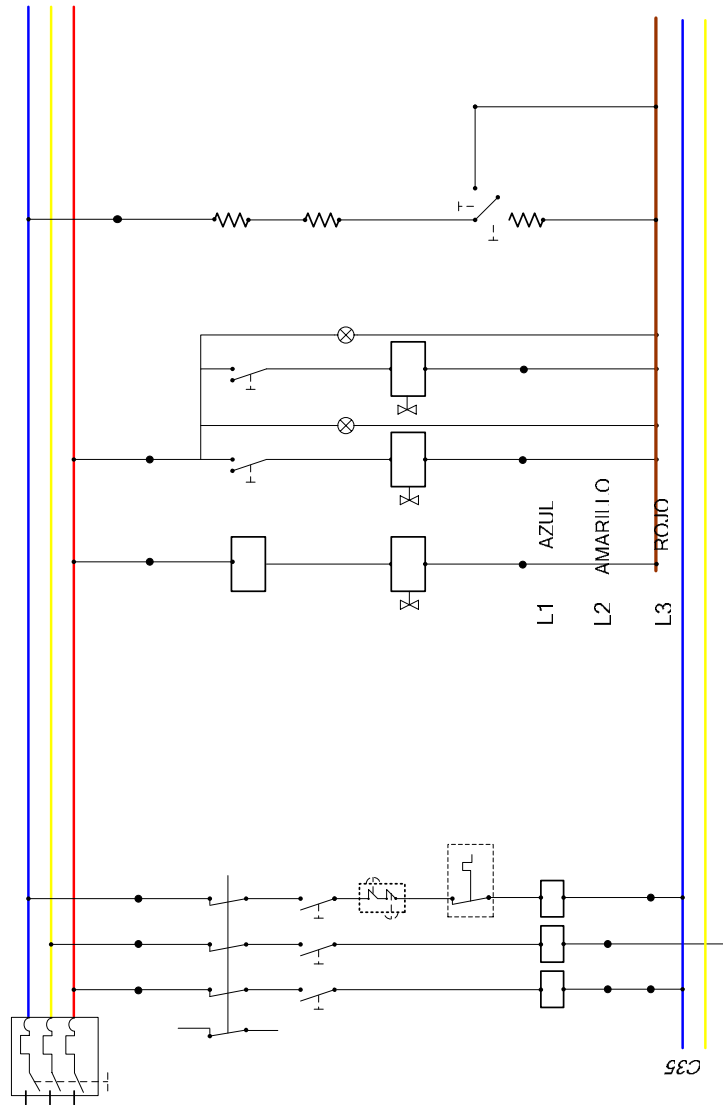
Es el circuito (ver figura 29) a corriente continua, utilizado para ordenar, gobernar, avisar, medir, etc., los elementos de funcionamiento de la máquina y permite asegurar la protección eléctrica del circuito de potencia (sobrecargas, etc.), la seguridad del personal.

14 2T1 4T2 6T3
C19
FR1

M1

4.3.1 Esquema del circuito de mando.

Figura 29. Esquema del circuito de mando



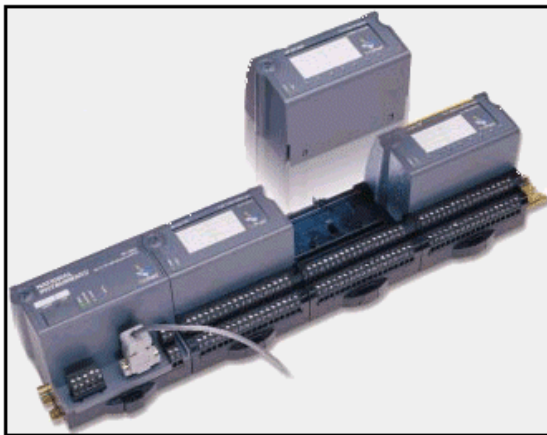
- S1 = Interruptor motor del evaporador
- S2 = Interruptor motor ventilador del condensador
- S3 = Interruptor motor ventilador del compresor
- S4 = Interruptor válvula de solenoide 1
- S5 = Interruptor válvula de solenoide 2
- S6 = Interruptor resistencias R1 y R2 en serie
- S7 = Interruptor resistencias R1,R2 y R3 en serie
- P1 = Presostato de alta
- P2 = Presostato de baja
- KM1 = Contacto Motor Evaporador
- KM2 = Contacto Motor Ventilador Condensador
- KM3 = Contacto Motor Ventilador Compresor

Fuente: Autor

4.4 HARDWARE DE MONITOREO Y CONTROL.

El monitoreo y control de la válvula de expansión electrónica es realizado a través de un sistema de National Instrument Fieldpoint (ver figura 30). FieldPoint es un sistema distribuido modular de E/S que provee soluciones económicas para aplicaciones de control y supervisión industrial.

Figura 30. Sistema FieldPoint



Fuente: Autor

El sistema FieldPoint incluye una variedad de módulos de E/S analógicas y digitales, al igual que el módulo de interfaz de redes inteligentes.

Los módulos FieldPoint empleados para este propósito son:

- Módulo FP-1000, modulo de red
- Módulo FP-AO-210 modulo de salidas análogas.
- Modulo FP TC 120, modulo de termocuplas.
- Módulo FP-DO-400, modulo de salidas digitales

4.4.1 Módulo de red FP-1000. Es el módulo de interfase para el manejo de comunicaciones entre el computador patrón y los módulos de E/S. La comunicación con el computador se realiza a través del puerto serial RS-232, y con los módulos mediante el bus local de alta velocidad a través del cual se

entregan y reciben órdenes para el control del cuarto frío. El módulo de red esta alimentado a 12 VCD (ver FP-1000 figura 31).

Figura 31. Módulo de red FP-1000



Fuente: Autor







4.4.2 Módulo FP-TC-120. Es el módulo de Termocuplas (figura 32) recibe la señal de temperatura desde los diferentes puntos del sistema de refrigeración por sus respectivos canales conectados como se describe en la tabla 16:



Figura 32. Modulo de red FP-TC-120



Fuente: Autor

Tabla 16. Ubicación Termocuplas.

CANAL	UBICACIÓN (ver figura 18)	FUNCIÓN	FOTO
0	Termocupla 1: Ubicada a la salida del compresor.	Mide la temperatura de descarga del compresor	
1	Termocupla 2: Ubicada en el interior del cuarto frío.	Mide la temperatura en el ambiente interior del cuarto frío.	
2	Termocupla 3: Ubicada a la entrada del compresor.	Mide la temperatura de entrada del compresor.	
3	Termocupla 4: Ubicada en el interior del cuarto frío.	Mide la temperatura del producto a conservar en el interior del cuarto frío.	
4	Termocupla 5: Ubicada a la salida del evaporador.	Mide la temperatura de saturación del refrigerante.	
5	Termocupla 6: Ubicada antes de las válvulas de expansión.	Mide la temperatura a la entrada de las válvulas de expansión.	

6	Termocupla 7: Ubicada a la entrada del evaporador	Mide la temperatura a la entrada del evaporador	
7	Termocupla 8: Ubicada en el tubo capilar del bulbo	Mide la temperatura del bulbo.	

Fuente: Autor

4.4.3 Módulo FP-A0-210. Es el módulo de salidas analógicas (figura 33) es utilizado para enviar las siguientes señales por sus respectivos canales:

CANAL 1: Envía una señal proporcional de 0 – 20 mA a los bornes del variador de velocidad para regular la frecuencia de alimentación del compresor.

Figura 33. Modulo de salidas análogas FP AO 210



Fuente: Autor

4.4.4 Módulo FP-DO-400. Módulo de salidas digitales (figura 34) envía señales para control de la válvula solenoide, la resistencia y el motor-ventilador de aire.

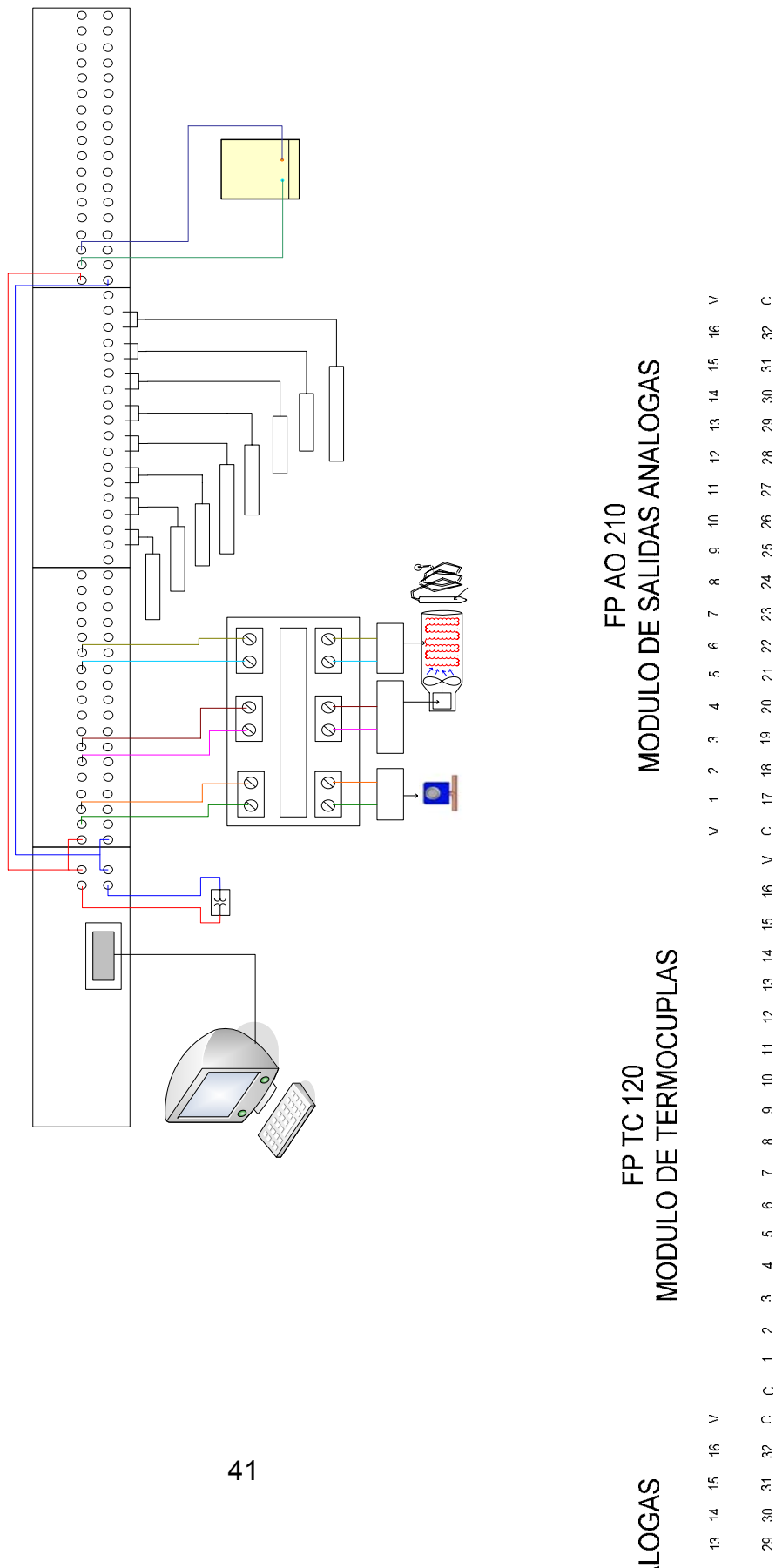
Figura 34. Módulo de salidas digitales FP DO 400



Fuente: Autor

La siguiente figura 35 muestra los módulos del FieldPoint anteriormente mencionados y sus respectivas conexiones de control:

Figura 35. Diagramas de conexión del FieldPoint



Fuente: Autor

5. DISPOSITIVOS DE CONTROL DE FLUJO.

El dispositivo de control de flujo debe realizar dos funciones en un sistema de compresión de vapor.

- Regular el flujo de refrigerante líquido que alimenta al evaporador, según sea la demanda.
- Crear una caída de presión, desde el lado de alta al lado de baja del sistema. Esta caída de presión da por resultado la expansión del refrigerante que fluye, haciendo que una pequeña cantidad del mismo se evapore, de manera que se enfríe hasta la temperatura de evaporación.

El dispositivo de control de flujo debe reaccionar ante un cambio en las condiciones, las que requieren a su vez un cambio en el flujo. Cuando aumenta la carga térmica en el evaporador, el dispositivo de control de flujo debe reaccionar y alimentar más refrigerante, y debe reducir el flujo cuando disminuye la carga. Es importante resaltar que los dispositivos de control de flujo no son un dispositivo de control de presión.

5.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CONTROL DE FLUJO

Todos los dispositivos de control de flujo tienen una abertura o pasaje restringido, el cual crea la diferencia de presión necesaria para llevar a cabo sus funciones de expansión. La mayoría de los dispositivos se construyen como válvulas, es decir, el pasaje restringido puede abrirse o cerrarse, y en algunos casos puede regularse entre totalmente abierto y totalmente cerrado. En la práctica se utilizan diversos tipos de dispositivos de expansión dependiendo del tipo de evaporador (evaporadores de expansión directa o siendo esta última la más común y la más utilizada. evaporadores inundados) como: válvula de expansión manual, válvulas

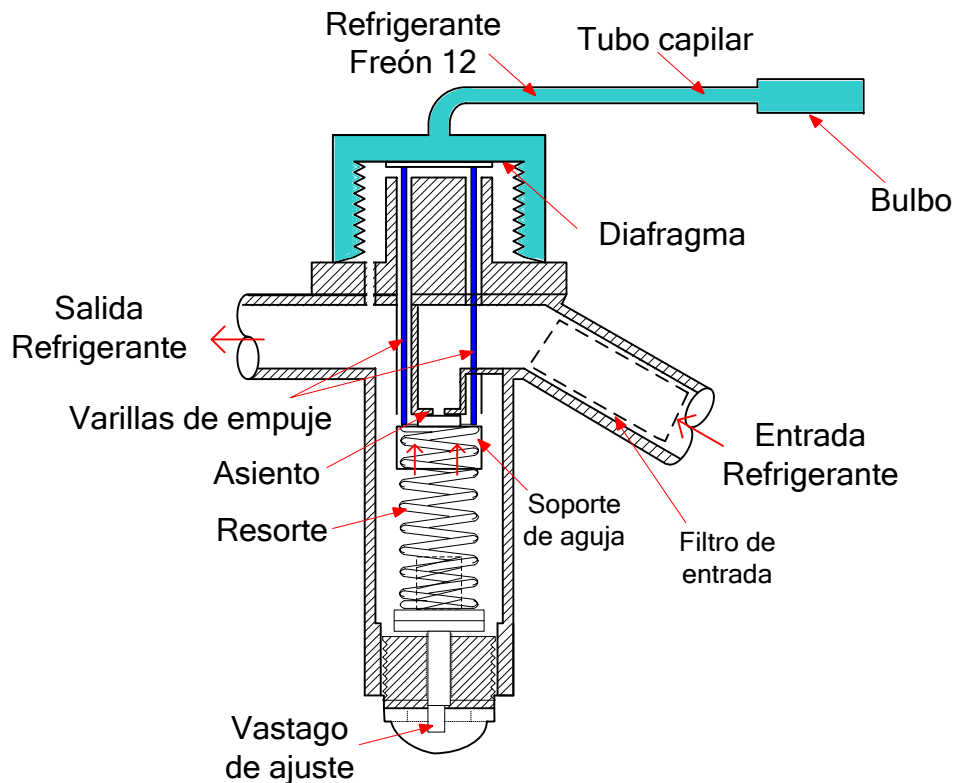
de flotador de lado de alta y de baja, válvulas de expansión automática, válvulas de expansión electrónica, válvula de expansión termostática

5.1.1 Válvula de expansión termostática (V.E.T.) Se pueden utilizar con sistemas de cualquier capacidad, ya sea con serpentines de expansión directa o con enfriadores de líquidos, de expansión seca. Realiza un buen control automático del flujo de refrigerante al evaporador, mientras mantiene en operación la mayor parte de la superficie de transferencia de calor a fin de evaporar el refrigerante a pesar de las variadas condiciones. Esto contribuye a mantener las necesidades de potencia en un nivel bajo.

La figura 36 es una vista en corte que muestra la válvula de expansión termostática y sus componentes. El refrigerante líquido fluye por la abertura entre el asiento y la aguja de la válvula. La restricción de la abertura produce la caída requerida de presión para lograr la expansión del refrigerante. El resorte empuja la aguja y tiende así a mantener cerrada la válvula, la guía del resorte lo mantiene alineado y en su lugar. El vástago de ajuste se puede hacer girar a fin de aumentar o disminuir la presión del resorte. Un diafragma flexible está conectado a las varillas de empuje, que a su vez están conectadas a la aguja. El movimiento descendente del diafragma separa la aguja del asiento y abre el orificio de la válvula.

La parte superior del diafragma está conectada a un tubo largo de diámetro pequeño, llamado el tubo capilar, y luego a un bulbo. El bulbo, el tubo y la cámara sobre el diafragma constituyen un solo espacio cerrado, el cual contiene un fluido que ejerce presión sobre el diafragma, el bulbo está unido a la línea de succión, cercano al evaporador, haciendo un buen contacto con la línea de succión, a lo largo de toda la longitud del bulbo.

Figura 36. Vista en corte de la válvula de expansión termostática

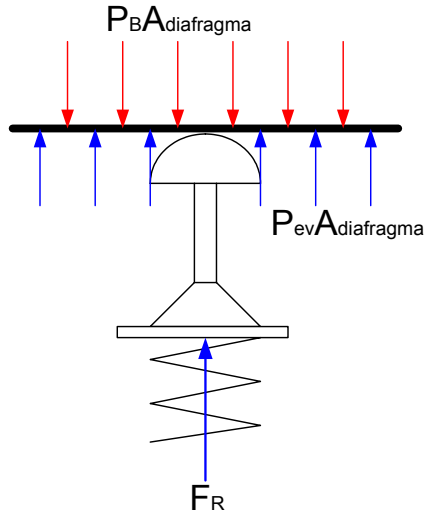


Fuente: Autor

5.1.1.1 Funcionamiento de la válvula de expansión termostática. El paso del refrigerante está regulado por el balance de tres fuerzas (ver figura 37), la fuerza del bulbo, la fuerza del resorte y la fuerza del evaporador. Esta fuerza del resorte produce una diferencia de temperaturas que se denomina sobrecalentamiento y se necesita para controlar la regulación de la válvula y para evitar que llegue refrigerante líquido al compresor.

La presión del bulbo (P_b), resultante de la presión ejercida por el fluido en el interior del bulbo y actúa sobre la parte superior del diafragma a fin de abrir la válvula. La presión de evaporador (P_e) actúa sobre la parte inferior del diafragma para cerrar la válvula. Cuando las presiones de apertura y cierre se equilibran mutuamente, la aguja de la válvula se encuentra en una posición fija y estable.

Figura 37. Diagrama de fuerzas



$$P_B A_{\text{diafragma}} = P_{ev} A_{\text{diafragma}} + F_R$$

$$P_B - P_{ev} = \frac{F_R}{A_{\text{diafragma}}} = \text{Constante}$$

Fuente: Autor

Esto es, cuando la válvula ni se abre ni se cierra, existe el siguiente equilibrio de presiones:

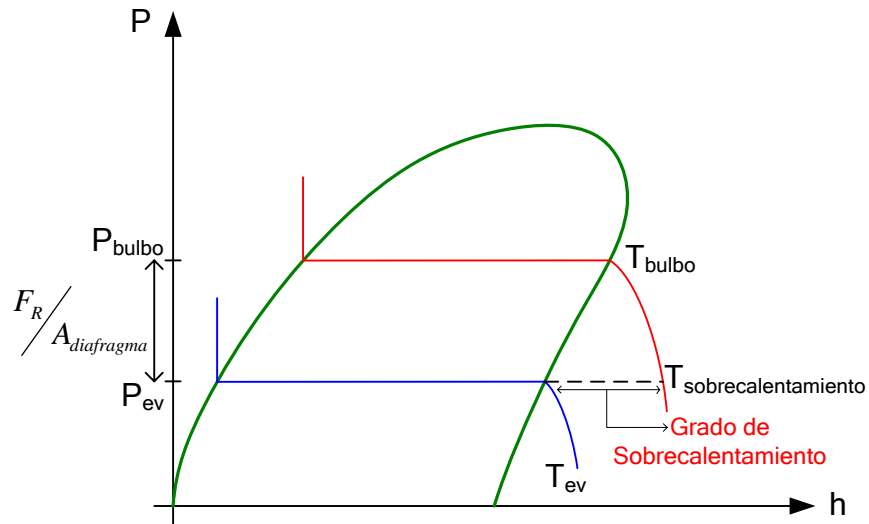
$$P_b = P_r + P_e$$

Si la presión del bulbo (de apertura) es mayor que la presión total de cierre (la presión del resorte más la presión del evaporador) la válvula se moverá hacia una posición aún más abierta que antes, y fluirá mayor cantidad de refrigerante. Por otra parte, la válvula tratará de cerrarse más, si las presiones de cierre son mayores que la presión de apertura.

5.1.1.2 Control del sobrecalentamiento. Si el fluido contenido en el bulbo de la V.E.T. es el mismo que circula por el sistema de refrigeración y además se carga con una cantidad de líquido lo suficientemente grande como para que bajo cualquier temperatura del bulbo no se produzca una vaporización total del refrigerante que existe en el, la presión ejercida por el bulbo sobre el diafragma de

la válvula será la correspondiente a la temperatura de saturación como se muestra en la figura 38.

Figura 38. Control del sobrecalentamiento



Fuente: Autor

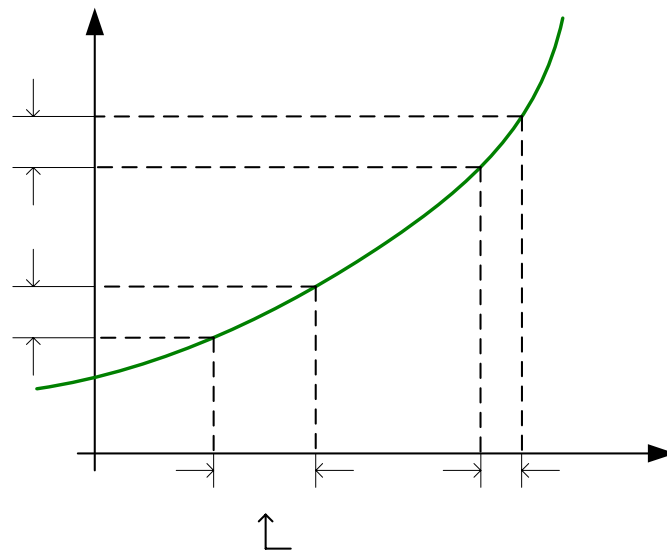
Como la $P_{bulbo} = P_{ev} + \frac{F_R}{A_{diafragma}}$, la temperatura de saturación del bulbo será siempre superior a la temperatura de evaporación en los grados que determinan la fuerza del resorte. Esta diferencia ($T_{bulbo} - T_{ev}$) se denomina *Grado de Sobrecalentamiento*. Por lo general, es satisfactorio que la válvula controle un grado de sobrecalentamiento entre 5° Y 9°C para proteger el compresor, cuando tiene lugar un sobrecalentamiento adicional en la línea de succión. No es posible controlar el sobrecalentamiento a exactamente 0°C, sin que corra el riesgo de que una cierta cantidad de líquido entre a la línea de succión. Por otra parte, un exceso de sobrecalentamiento indica que la superficie de transferencia de calor no se utiliza con eficiencia. La válvula de expansión termostática opera controlando

un grado de sobrecalentamiento constante, en las condiciones de salida del evaporador.

Este diseño básico de la válvula de expansión termostática tiene varias desventajas:

- Se producen mayores sobrecalentamientos a bajas temperaturas por razón de que la relación de presión contra temperatura de saturación de los refrigerantes no es lineal sino una relación curva (figura 39).

Figura 39. Sobrecalentamiento a bajas temperaturas de evaporación



Fuente: Autor

- La caída de presión en el evaporador produce también un aumento de sobrecalentamiento (ver figura 40).

P_{sat}

Figura 41. Válvula de Expansión Electrónica

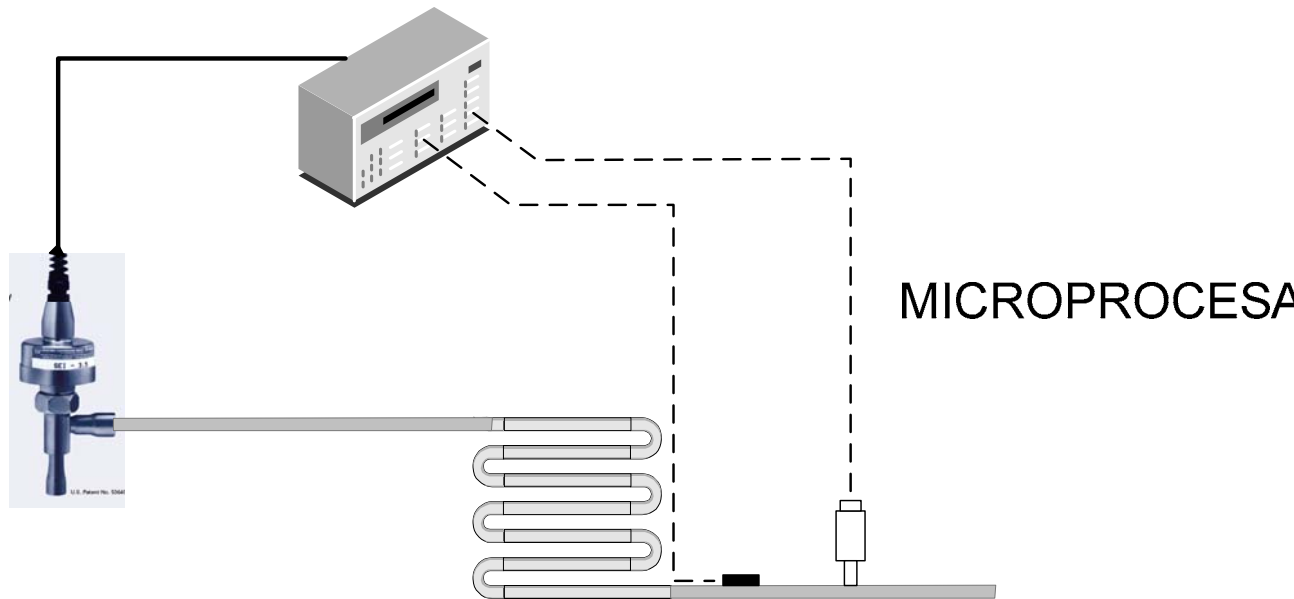


Fuente: Catalogo de Válvulas Sporland

La operación de la válvula de expansión electrónica está basada en el control del sobrecalentamiento del refrigerante mediante el sensor de temperatura, junto con el control de la Presión Máxima de Operación (MOP) y Presión Mínima de Operación (LOP) mediante el transductor de presión como lo muestra la figura 42.

Una señal se transmite desde el controlador (microprocesador) al actuador. De esta forma se produce un aumento de presión en el actuador, el cual se traduce en una fuerza.

Figura 42. Operación de la Válvula de Expansión Electrónica



Fuente: Autor

Esta fuerza actuará sobre el diafragma y sobre el vástago de presión, y por tanto determina el grado de apertura de la válvula. El controlador proporciona un suministro de potencia variable, lo cual asegurará el correcto posicionamiento de apertura de la válvula, de forma que se obtiene el flujo de líquido requerido. Si el suministro de tensión se corta, la válvula se cierra.

Estas son las principales características que diferencian una válvula de expansión electrónica de una válvula de expansión termostática:

- Compatibilidad con todos los refrigerantes.
- Precisión de regulación del refrigerante, esto es por la gran carrera del orificio de regulación donde puede llegar a la décima de milímetro y puede controlar el grado de sobrecalentamiento de forma estable.
- Regulación mediante microprocesado.

Otras características adicionales como:

- Consumo de potencia mínimo (4 Watts).
- Mantiene en operación la mayor parte de la superficie de calor.
- Reacción rápida ante perturbaciones.
- No histéresis.

5.2 CONVERSIÓN DE UNA VÁLVULA DE EXPANSIÓN TERMOSTÁTICA EN UNA VÁLVULA DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICA

Principio general

El desarrollo de una válvula de expansión electrónica para el cuarto frío se basa en que a partir de una válvula de expansión termostática mediante modificaciones menores y fáciles de implementar se pueda lograr el control del grado de sobrecalentamiento.

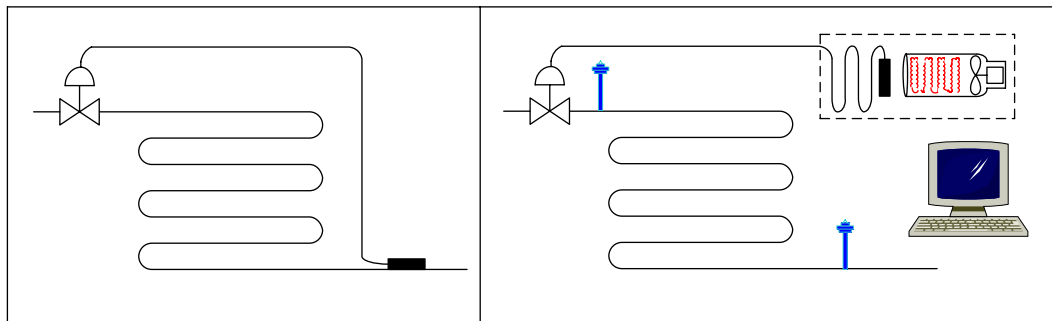
La acción de control de la válvula (VET ó VEE) a través del bulbo remoto, cuya presión actúa tratando de abrir la válvula, se realiza de la siguiente forma (ver tabla 17):

Tabla 17. Acción de control de la VET y VEE

	ACCIÓN DE CONTROL	PRE-ACTUADOR	ACTUADOR	SENSOR
VET	Por contacto directo del bulbo sobre el tubo a la salida del evaporador (ver figura 42a).	Ninguno	Presión del bulbo	Bulbo remoto
VEE	El bulbo recibe una excitación térmica indirecta mediante un mecanismo de calentamiento-enfriamiento (resistencia y ventilador de aire) como lo muestra la figura 42b.	Resistencia y motor-ventilador	Presión del bulbo	Termocuplas a la entrada y salida del evaporador

Fuente: Autor

Figura 43. Conversión de una VET en una VEE



Fuente: Autor

5.2.1 Modificación a la V.E.T. para convertirla a V.E.E. La válvula de expansión termostática funciona mediante un balance de fuerzas ($P_{bulbo} = P_{ev} + \frac{F_R}{A_{diafragma}}$); La

P_{bulbo} determina la apertura de la válvula el cual puede modificarse de su condición normal de sensado sobre la superficie del tubo a la salida del evaporador a un ambiente externo determinado por el nuevo diseño (figura 43). Para este proceso

de modificación se analizaron diferentes factores para mejorar el tiempo de respuesta de la válvula como lo muestra la figura 44. Dichos factores dependen de los principales elementos del sistema como son el fluido interior del bulbo, el resorte de balance y la forma de suministrar la energía externa al bulbo. Se considerarán para cada uno de estos factores varias alternativas como se muestra en el cuadro siguiente:

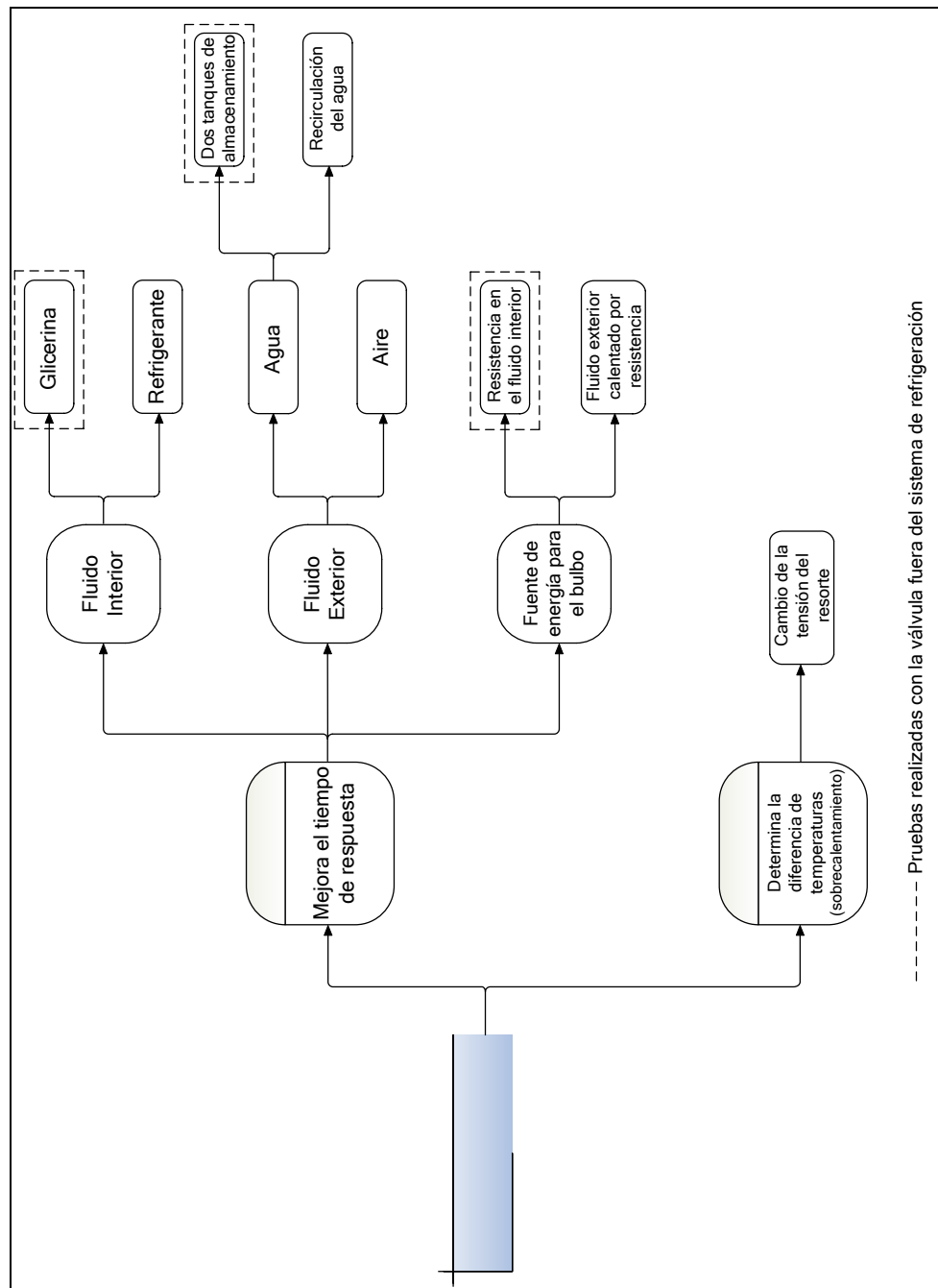
}

}

a) Selección del mejor fluido interno

b) Selección de las mejores características de sobrecalentamiento

Figura 44. Elementos a modificar en la válvula de expansión



Fuente: Autor

5.2.1.1 Selección del fluido interno dentro del bulbo para una respuesta adecuada. De acuerdo al principio de funcionamiento requerido para la VEE se propone que mediante un calentamiento externo se produzca una rápida expansión del fluido. Para esta selección se plantearon las siguientes alternativas:

- Dejar el fluido de trabajo normal el cual funciona por vaporización parcial.
- Llenar el subsistema del bulbo con un líquido subenfriado que llene totalmente el espacio mediante calor sensible aportado desde el exterior, aprovechando la expansión producida en el para mover la válvula en el sentido de apertura.

Dicho fluido debería tener las siguientes características:

- Capacidad calórica (C_p) baja.
- No tóxico.
- Fácil manipulación.
- Económico

La capacidad térmica o calor específico de una sustancia es la cantidad de energía necesaria para aumentar 1°C su temperatura, es decir, indica la mayor o menor dificultad que presenta dicha sustancia para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. En la siguiente tabla 18 se comparan tres fluidos analizados en las pruebas con sus calores específicos y sus respectivas ventajas.

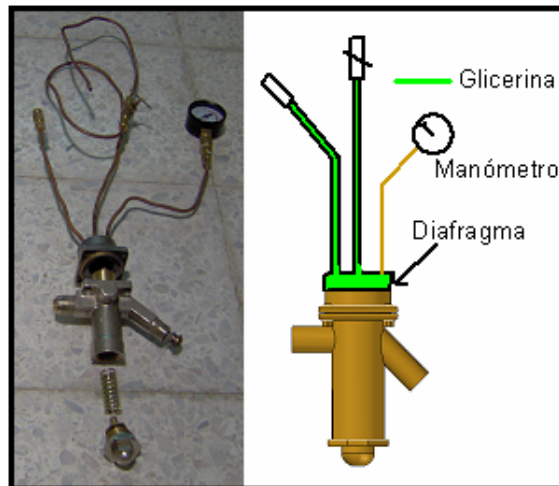
Tabla 18. Capacidad calórica del agua, glicerina y R-134a y sus ventajas

	Capacidad calórica C_p $\left[\frac{J}{Kg.K} \right]$	Capacidad calórica baja	No tóxico	Fácil manipulación	Económico
Agua	4180		✓	✓	✓
Glicerina	2430	✓	✓	✓	✓
R-134a	1440	✓			

Fuente: Autor

El fluido mas conveniente era la *glicerina* que se introdujo en el bulbo (ver figura 45) a una presión de 50 psi para luego suministrarle calor.

Figura 45. Válvula de expansión con glicerina en el bulbo



Fuente: Autor

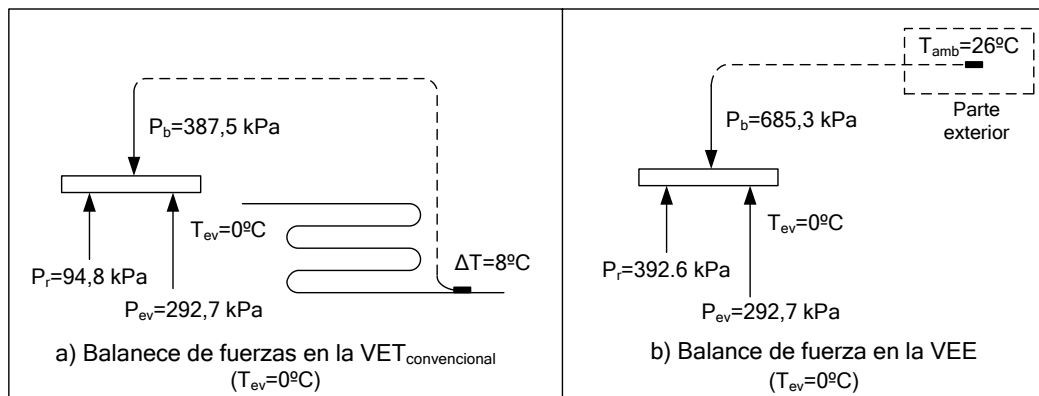
Procedimiento

Se suministra calor a la glicerina y se verifica cuanto tarda la válvula en abrirse, pero después de un tiempo prolongado la válvula no experimentó ninguna abertura y tampoco experimentó ningún aumento en la presión. En conclusión se

decidió descartar este tipo de fluido (glicerina) y mantener el refrigerante que originalmente contiene la válvula.

5.2.1.2 Determinación de las características del resorte a utilizar. El resorte de la válvula de expansión termostática con control electrónico deberá balancear la apertura de la válvula de tal forma que cuando el bulbo se encontrara en la parte exterior del cuarto frío cumpliera con el balance de fuerzas en el diafragma como una válvula de expansión termostática convencional (considerando que el fluido dentro del bulbo es el mismo refrigerante) como lo muestra la siguiente gráfica 2.

Grafica 2. Balance de fuerzas de una válvula de expansión convencional y la válvula de expansión con control electrónico



Fuente: Autor

En los dos casos la presión del bulbo (P_b) corresponde a la presión de saturación del refrigerante R-134a a la temperatura que sensa el bulbo, un grado de sobrecalentamiento de 8°C y el evaporador trabajando a 0°C . Como $P_r = P_b - P_{ev}$ se determina la presión ejercida por el resorte para la VET y la VEE como lo muestra la siguiente tabla 19.

Tabla 19. Presión ejercida por el resorte para la VET y la VEE

CASO	P_b	P_{ev}	$P_r = P_b - P_{ev}$
		Presión de saturación a 0°C	
VET _{convencional}	Presión de saturación a 8°C	292,7 kPa	94,8 kPa
	387,5 kPa		
VEE	Presión de saturación a 26°C	292,7 kPa	392,6 kPa
	685,3 kPa		

Fuente: Autor

Se observa que debe aumentarse la tensión del resorte en la VEE hasta 392,6 kPa para que mantenga la misma apertura que en la operación convencional con 8°C de sobrecalentamiento. Se seleccionó un resorte que ejerciera una presión efectiva de 416 kPa (60 psi) y se incorporó en la VEE (ver figura 46).

Figura 46. Cambio de resorte en la V.E.E.

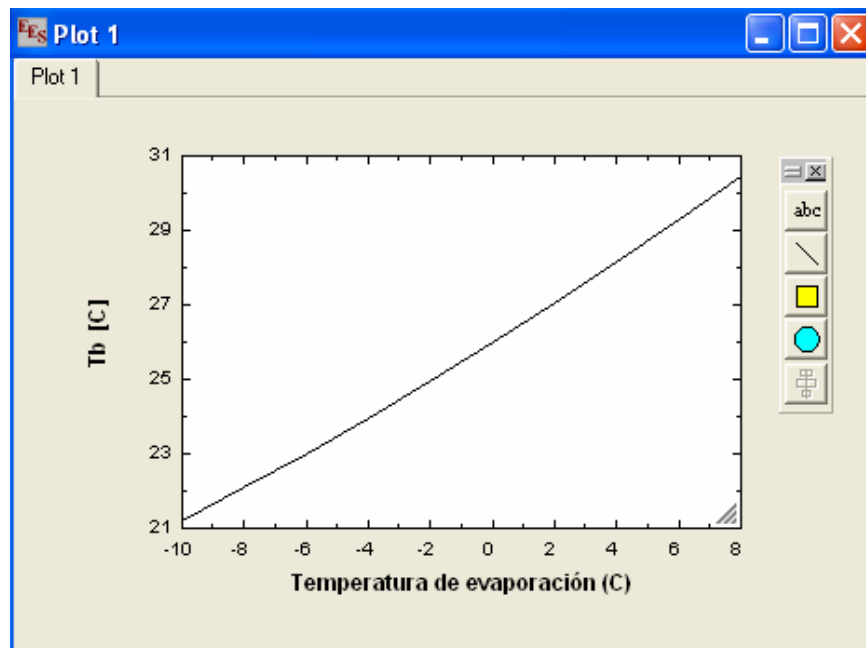


Fuente: Autor

Como en operación normal del sistema se tendrán otras temperaturas de evaporación (T_{ev}) diferentes a 0°C y otros grados de sobrecalentamiento la temperatura del bulbo externo ($T_{b \text{ externo}}$) deberá modificarse para lograr una

apertura adecuada para mantener la tasa de vaporización requerida en el sistema de refrigeración. La siguiente gráfica 3 muestra los valores que debe tener la temperatura del bulbo externo ($T_{b \text{ externo}}$) para diferentes temperaturas de evaporación (T_{ev}) y el mismo grado de sobrecalentamiento.

Gráfica 3. Temperatura del bulbo externo para diferentes temperaturas de evaporación en la V.E.E.



Fuente: Programa Engineering Equation Solver

5.2.1.3 Selección de la mejor forma de suministrar la energía para la expansión del fluido dentro del bulbo remoto. Se requiere que el calor aportado al bulbo remoto sea transferido eficientemente al fluido interior para obtener una respuesta rápida del sistema. Además el medio utilizado debe permitir la rápida inversión de la tendencia de apertura de la válvula (abrir-cerrar). Para este análisis se consideraron las siguientes alternativas de calentamiento del bulbo:

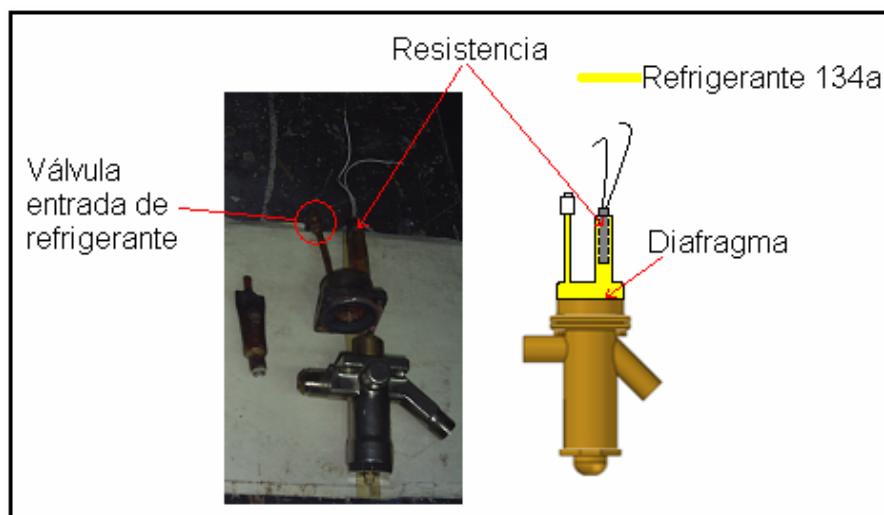
- Por resistencia interior
- Calentamiento-enfriamiento con agua
- Calentamiento-enfriamiento con aire

5.2.1.3.1 Calentamiento por resistencia interior. Se implementó una resistencia de 80 Vatios dentro del bulbo (ver figura 47) para verificar el comportamiento de la válvula ante el calentamiento del refrigerante por medio de la resistencia pero se presentaron los siguientes inconvenientes debido a las altas temperaturas presentadas durante el montaje de la resistencia debido a las altas temperaturas del proceso de soldadura requerido para incorporar la resistencia dentro del bulbo:

- Desprendimiento del diafragma
- Alteraciones internas de la resistencia
- Poros en la válvula el cual produce fugas del refrigerante

Debido a estos inconvenientes no se pudo obtener ningún registro de datos y se optó por no adaptar este mecanismo.

Figura 47. Resistencia en la válvula de expansión.



Fuente: Autor

5.2.1.3.2 Calentamiento-enfriamiento con agua. Se necesita diseñar un mecanismo sencillo y eficiente de transferencia de energía al bulbo de la VEE que responda rápidamente a cualquier tipo de perturbación realizada al cuarto frío. Se realizaron dos montajes;

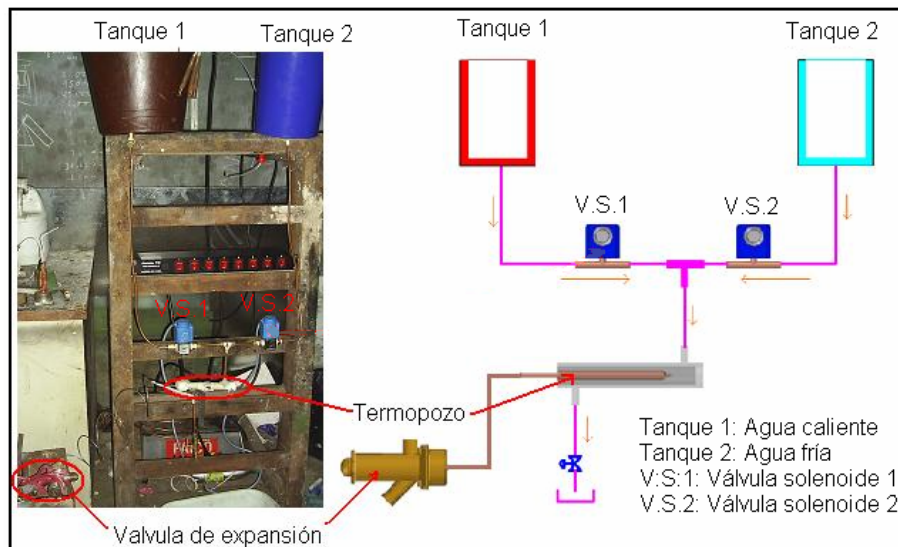
MONTAJE A) Dos tanques de almacenamiento.

Se instalaron los siguientes componentes para la realización de las pruebas (ver figura 48):

- Dos tanques de almacenamiento de agua
- 3 resistencias eléctricas de 80 Vatios cada una
- Dos válvulas solenoides
- Termopozo
- Tanque de desagüe

El tanque 1 es calentado por medio de tres resistencias hasta alcanzar una temperatura aproximada de 80°C, el tanque 2 es enfriado por medio de unos bloques de hielo hasta que alcance una temperatura aproximada de 14°C, el compresor es conectado a la válvula de expansión termostática por medio de una manguera para verificar la abertura de la válvula. Las válvulas solenoides restringen el paso de agua fría o caliente según se requiera.

Figura 48. Calentamiento-enfriamiento con dos tanques de almacenamiento



Fuente: Autor

Procedimiento

- Se activa la válvula solenoide (V.S.1) para permitir el paso de agua caliente por gravedad hacia el termopozo y calentar el bulbo para luego registrar el tiempo que demora la válvula en abrirse.
- Después de abierta la válvula se activa la válvula (V.S.2) para permitir el flujo de agua fría y registrar el tiempo que demora la válvula en cerrarse.

Datos obtenidos

Se tomaron 6 registros como lo muestra la siguiente tabla 20.

Tabla 20. Tiempo de abertura y cierre de la V.E.E.

Prueba	Tiempo que tarda la válvula en abrirse (seg)	Tiempo que tarda la válvula en cerrarse (seg)
1	18,6	33,4
2	22,1	30,4
3	19,2	36,8
4	24,4	40,8
5	19,8	36,1
6	20,6	37,4
Promedio	20,7	35,8

Fuente: Autor

Aunque se obtiene una buena respuesta de la VEE, este montaje (A) tiene sus ventajas y desventajas como son:

Ventajas:

- Tiempo de abertura relativamente corto (20,7 seg)
- El cambio de temperatura rápida por la utilización de dos tanques.

Desventajas:

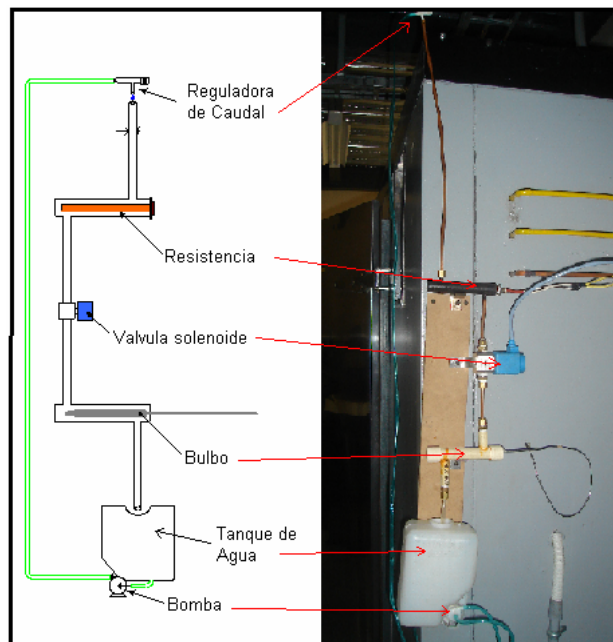
- Desperdicio de agua.
- Se necesita de un pre-calentamiento del agua antes de iniciar el proceso.
- Consumo de energía alto (3 resistencias y 2 válvulas solenoides).
- Contiene muchos elementos de construcción (tubería, racores, etc).
- Disponibilidad del hielo.

MONTAJE B) Recirculación de agua. Para este procedimiento (ver figura 49) se eliminaron los tanques de almacenamiento de agua fría y caliente para evitar pérdidas de agua y se implementaron los siguientes elementos:

- Resistencia de 100 Vatios a 110 voltios
- Válvula solenoide a 110 voltios
- Bomba de 12 voltios
- Reguladora de caudal.

Se instaló la válvula de expansión termostática con control electrónico en el cuarto frío, donde el bulbo de la válvula es sacado del cuarto frío para monitorear y controlar la abertura de la válvula a través del calentamiento y enfriamiento del agua por medio de una resistencia. La bomba es ubicada en la parte inferior del tanque para recircular el agua y aprovechar el calor suministrado por la resistencia. La válvula solenoide restringe el paso de agua.

Figura 49. Sistema calentamiento-enfriamiento del bulbo con recirculación del agua



Fuente: Autor

Procedimiento

- a) Se realiza un calentamiento previo del bulbo para abrir parcialmente la válvula y permitir el paso de refrigerante al evaporador.
- b) Se programa el grado de sobrecalentamiento a controlar a través del programa LabVIEW.
- c) Mediante la reguladora de caudal se determina el flujo de agua a circular.

Ventajas:

- Se utiliza poca agua.
- Se reduce solo a una resistencia y a una válvula solenoide.

Desventajas:

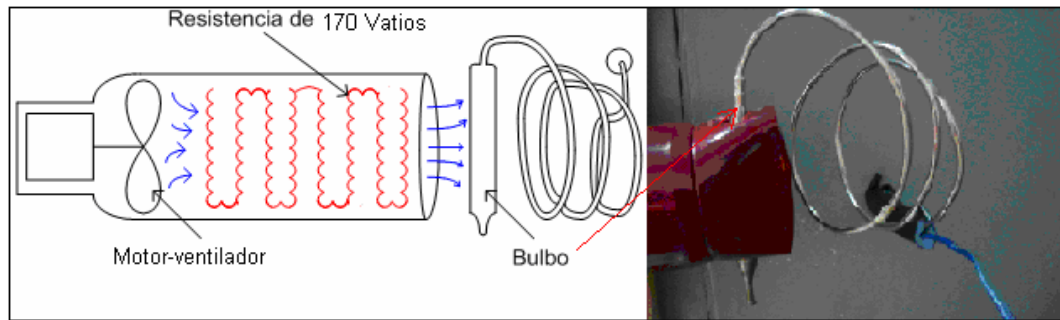
- Demora en el calentamiento.
- El enfriamiento se hace a temperatura ambiente es decir, el agua se enfría muy lentamente.

En el capítulo 7 se explicara las gráficas y los datos obtenidos con este montaje (B).

5.2.1.3.3 Calentamiento-enfriamiento con aire. Debido a la lenta respuesta de la válvula mediante la recirculación de agua, se implementó un nuevo mecanismo de calentamiento-enfriamiento del bulbo por medio del aire donde se utilizaron los siguientes elementos (ver figura 50):

- Motor-ventilador
- Resistencia de 170 Vatios
- Tubo conductor de aire

Figura 50. Sistema calentamiento-enfriamiento del bulbo con aire



Fuente: Autor

Montaje

Se instaló la resistencia y el ventilador a través de un tubo teniendo el bulbo lo más cerca posible a la salida del conducto.

Procedimiento

- a) Se calienta la resistencia a una velocidad de ventilador baja cuando se necesita abrir la válvula.
- b) Se enfría el bulbo a una velocidad de ventilador alta cuando se necesita cerrar la válvula.

Ventajas:

- Calentamiento-enfriamiento del bulbo eficiente.
- Pocos elementos de instalación (resistencia, ventilador).
- Ahorro de energía

En el capítulo 7 se explicaran las gráficas y los datos obtenidos con mecanismo.

5.2.1.4 Factores a tener en cuenta para la selección del mecanismo de calentamiento-enfriamiento del bulbo. Se tuvo en cuenta la capacidad calórica (C_p) y la conductividad térmica (K), para seleccionar el mecanismo de calentamiento-enfriamiento más eficiente al bulbo remoto. (Tabla 21).

Tabla 21. Propiedades del agua y del aire.

	$C_p \left[\frac{J}{Kg.K} \right]$	$K \left[\frac{W}{mK} \right]$	Ventajas	Desventajas
Agua	4180	0,58	-Transferencia de calor más eficiente al bulbo.	-Tiempo largo de calentamiento. - Enfriamiento lento.
Aire	1004	0,02	-Calentamiento rápido al bulbo - Enfriamiento rápido al bulbo.	- Transferencia de calor baja al bulbo.

Fuente: Autor

6. ESCENARIOS DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Los sistemas de refrigeración han utilizado de forma general la válvula de expansión termostática del tipo tradicional debido a su buena operación y rendimiento, pero actualmente el mercado nos presenta la válvula de expansión electrónica. Este es un dispositivo servo accionado que regula el flujo del refrigerante de forma variable, utilizando sensores de presión y temperatura que son leídos y procesados por un controlador que decide en tiempo real la apertura óptima de la válvula.

Con miras a desarrollar un funcionamiento similar a la V.E.E, se realizaron varios estudios para el mecanismo de calentamiento-enfriamiento que tuviera un control y una respuesta óptima a las posibles perturbaciones presentadas en un sistema de refrigeración como son; la carga impuesta sobre el sistema, la temperatura de almacenamiento del producto (temperatura de referencia), las diferentes perturbaciones que sufre el ambiente refrigerado y la temperatura ambiental externa.

Para obtener un sistema de refrigeración eficiente y de bajo consumo energético se deben mantener el grado de sobrecalentamiento y la temperatura de evaporación (T_{ev}) constantes. Con base en las condiciones anteriores, se crearon diferentes escenarios de trabajo para determinar la controlabilidad del grado de sobrecalentamiento basada en la variación de la apertura de la VEE y la controlabilidad del compresor que se realiza por medio del variador de velocidad. Las diversas situaciones están diferenciadas de acuerdo a modificaciones que se hicieron en los subsistemas que componen el cuarto frío como lo muestra la figura 51.

Figura 51. Escenarios del proceso de investigación

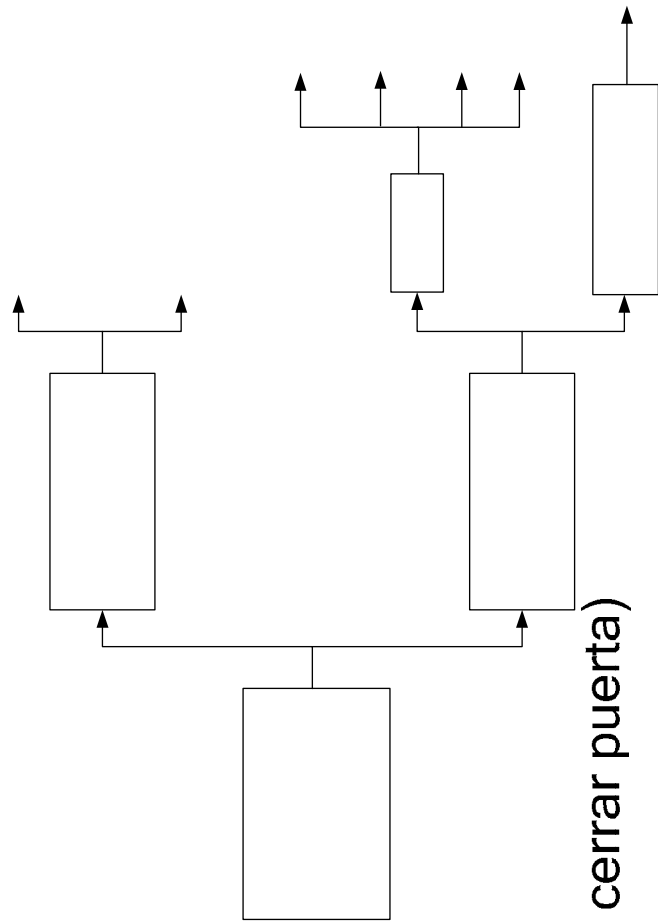


FIGURA 52. Es

Fuente: Autor

Q_{PUERTAS} (Abrir y cerrar puerta)

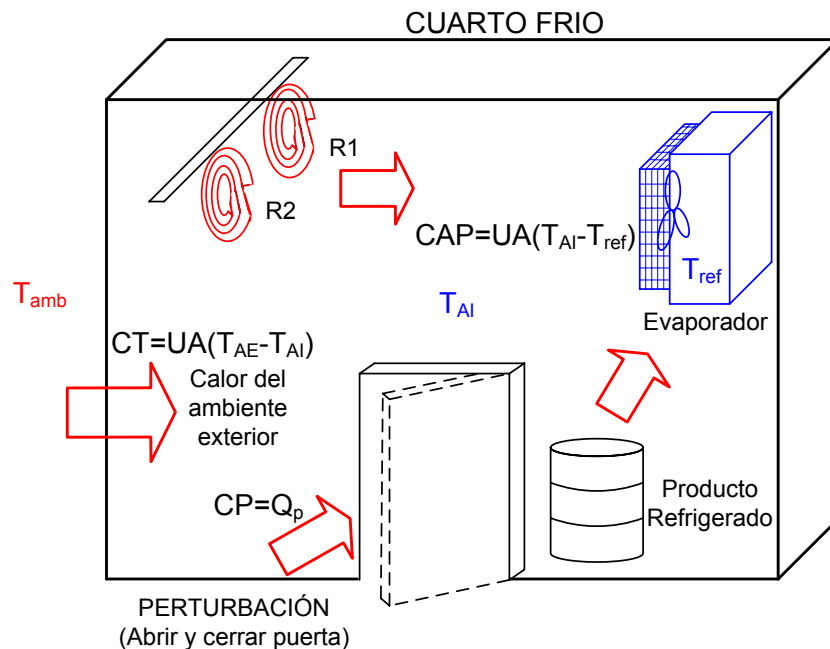
Q_{INTERIOR} (Resistencia eléctrica, producto)

6.1 MODIFICACIONES EN LA CARGA DEL SISTEMA.

En condiciones normales de trabajo el ambiente refrigerado es sometido a cargas térmicas repentinas provenientes del ambiente exterior y de las personas que entran al ambiente de conservación cuando es necesario abrir la puerta del cuarto frío para sacar algún elemento conservado. Se realizaron dos tipos de perturbaciones (ver figura 52):

- Perturbación en el ambiente interior (ambiente refrigerado), abriendo y cerrando la puerta del cuarto durante aproximadamente 1,5 minutos.
- Perturbación al sistema mediante resistencias eléctricas ($R1=986\text{ W}$, $R2=972\text{ W}$, $R3=1014\text{ W}$) que se conectaron de la siguiente forma:
Conexión en serie $\rightarrow R1, R2$ y $R3 = 352,8\text{ W} = R4$
Conexión en serie $\rightarrow R1$ y $R2 = 547,5\text{ W} = R5$

Figura 52. Componentes del balance de energía en el cuarto frío



Fuente: Autor

CAP=Capacidad del sistema de refrigeración

CP=Carga térmica debida a las perturbaciones (Abrir y cerrar puerta, resistencias eléctricas, producto)

CT=Carga térmica debida al calor proveniente del ambiente exterior

T_{AI} =Temperatura ambiente interior del cuarto

T_{amb} =Temperatura ambiente exterior;

$CAP=Q_{EVAPORADOR}$

$CP=Q_{perturbaciones}=Q_{resist.}+Q_{abrir-cerrar}+Q_{producto}+Q_{interior}$

$CT=Q_{paredes}=UA_{EXT}(T_{amb}-T_{ref})$

$Q_{producto}=m_{prod}C_p\Delta T_{producto}$

$Q_{interior}=m_{aire}C_p\Delta T_{aire}$

Entonces;

$CAP=Q_{resist.}+Q_{abrir-cerrar}+m_{prod}C_p\Delta T_{producto}+m_{aire}C_p\Delta T_{aire}+UA_{EXT}(T_{amb}-T_{ref})$ (3)

6.2 MODIFICACIONES AL SISTEMA DE CONTROL

El objetivo principal del sistema de control del cuarto frío es el de mantener el grado de sobrecalentamiento y la temperatura de referencia constantes ante cualquier tipo de perturbación. Estas variables son controladas a través de la VEE y el compresor.

6.2.1 Controlabilidad de la VEE. Se requiere implementar un sistema de calentamiento-enfriamiento eficiente, que por medio del control on-off ó PID mantenga el grado de sobrecalentamiento constante deseado por el usuario. También se tuvieron en cuenta otros factores como la tensión del resorte y el aislamiento del tubo capilar del bulbo.

6.2.1.1 Mecanismo calentamiento-enfriamiento por agua. Esta estrategia de control On-Off se realiza mediante la conexión y desconexión de la resistencia y la válvula solenoide (ver figura 53) por medio del programa LabVIEW (ver tabla 22). La bomba se opera de forma manual a través de un interruptor externo.

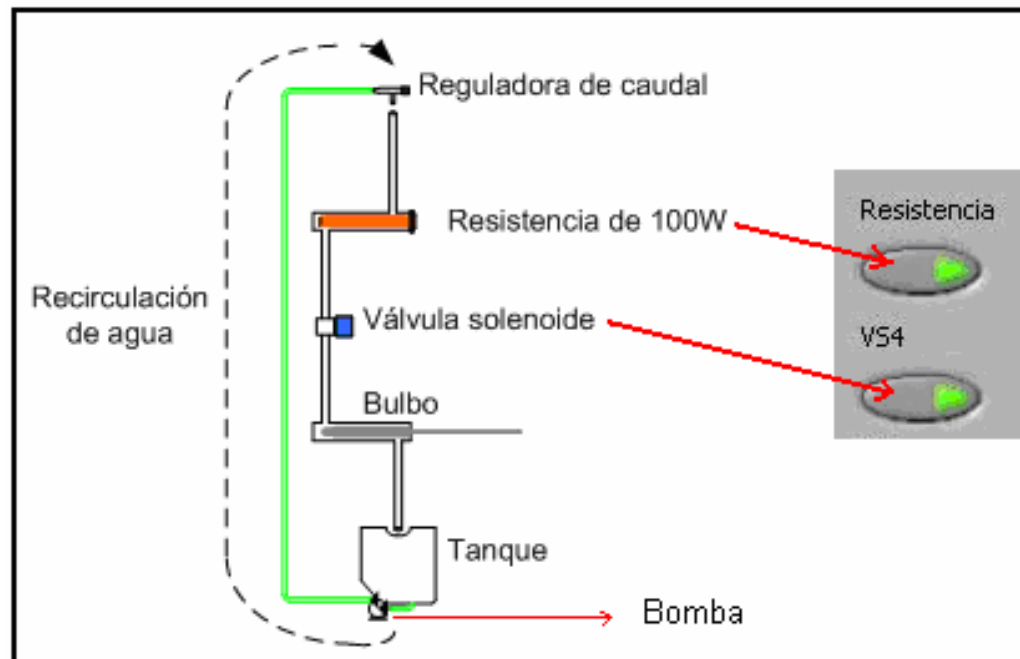
Tabla 22. Control on-off del mecanismo calentamiento-enfriamiento por agua

Condición	Resistencia	Válvula solenoide (VS4)
Si $\text{Sobre}_{\text{real}} > \text{Sobre}_{\text{ref}}$	on	on
Si $\text{Sobre}_{\text{real}} < \text{Sobre}_{\text{ref}}$	off	on

Fuente: Autor

$\text{Sobre}_{\text{real}}$ = Grado de sobrecalentamiento en tiempo real.
 $\text{Sobre}_{\text{ref}}$ = Grado de sobrecalentamiento a controlar.

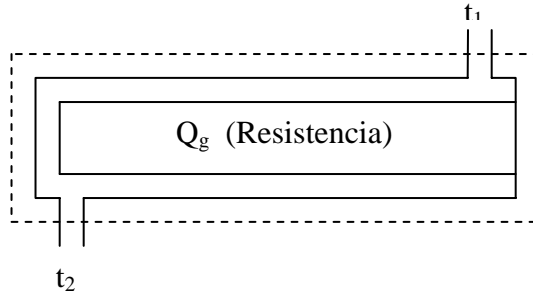
Figura 53. Recirculación de agua con control on-off



Fuente: Autor

Para determinar la temperatura de salida del agua a través de la resistencia se hizo el siguiente balance de energía:

Balance global de energía en la resistencia



$$Q_g = hA_c(T_{ma} - T_\infty) + \dot{m}Cp(t_2 - t_1) \quad (4)$$

donde $T_{ma} = \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)$, entonces:

$$Q_g = hA_c \left[\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) + T_\infty \right] + \dot{m}Cp(t_2 - t_1) \quad (5)$$

despejando t_2 se obtiene:

$$t_2 = \frac{\left[\frac{Q_g}{hA_s} - T_\infty - t_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{\dot{m}Cp}{hA_s} \right) \right]}{\left(\frac{1}{2} + \frac{\dot{m}Cp}{hA_s} \right)} \quad (6)$$

donde:

Q_g = Calor generado por la resistencia = 100 W

$$h = 120 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

A_s = Área superficial = $\pi DL = \pi(0,025m)(0,12m) = 0,009425m^2$

T_∞ = Temperatura ambiente = 26°C

\dot{m} = Rata de flujo de agua

$$Cp = 4180 \frac{J}{Kg \cdot K}$$

t_2 = Temperatura de salida del agua

t_1 = Temperatura de entrada del agua = 23°C

El montaje del mecanismo calentamiento-enfriamiento por recirculación de agua, nos da la posibilidad de manejar varios flujos a través de la reguladora de caudal.

Al respecto se escogieron dos tipos de flujos (\dot{m}_1, \dot{m}_2) para analizar el tiempo de respuesta del la V.E.E. (ver tabla 23).

Tabla 23. Diferencia de temperaturas para diferentes flujos de agua

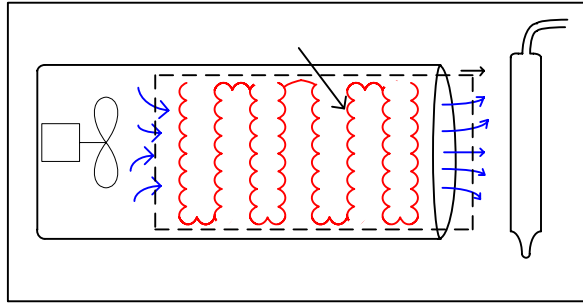
	Temperatura de salida (t_2) Ecuación (6)	Diferencia de temperatura ΔT
$\dot{m}_1 = 0,02582 \frac{Kg}{seg}$	23,41°C	0,41°C
$\dot{m}_2 = 0,04045 \frac{Kg}{seg}$	23,26°C	0,26°C

Fuente: Autor

A un menor flujo se produce un calentamiento más rápido, pero el enfriamiento demora más tiempo en alcanzar la temperatura ambiente.

6.2.1.2 Mecanismo calentamiento-enfriamiento por aire. Para la segunda etapa de pruebas y buscando una respuesta más rápida de la VEE, se instaló una resistencia térmica dentro de un tubo (ver figura 54) donde el tipo de control es PID, el cual se explicará detalladamente en el capítulo 8.

Figura 54. Calentamiento-enfriamiento por aire



Fuente: Autor

Resis

Por medio del ventilador se manejaron dos velocidades de flujo de aire, para determinar la temperatura de calentamiento y enfriamiento del bulbo. (Ver tabla 24).

Tabla 24. Velocidades del flujo de aire

Alimentación	Velocidad de flujo de aire	Bulbo T_{in}
3 voltios	1,3 m/s	Calentamiento
8 voltios	5,0 m/s	Enfriamiento

Fuente: Autor

6.2.1.3 Aislamiento del tubo capilar del bulbo. Este proceso se logró aislando todo el tubo capilar del bulbo remoto para aprovechar el calor suministrado por el agua al bulbo, y mejorar el tiempo de respuesta de la válvula de expansión con control electrónico.

6.2.1.4 Modificación de la tensión del resorte. Haciendo girar el vástago de ajuste se obtienen diferentes tensiones del resorte en la VEE, que determinan el grado de sobrecalentamiento. Se manejaron dos tipos de tensiones;

- Máxima tensión mediante el cual se obtiene una válvula normalmente cerrada (ver figura 46), que es el resorte implementado antes de comenzar las pruebas.
- Media tensión, que busca disminuir la presión del resorte y así dejar circular un pequeño flujo de refrigerante desde el encendido del equipo.

6.2.2 Controlabilidad del compresor. Generalmente se requiere algún método de control de la capacidad del compresor cuando hay una variación en la carga del sistema. Para tal propósito se crearon dos escenarios de trabajo que fueron:

- Sin variador de velocidad: El compresor bombea un volumen constante durante todo el proceso a una misma velocidad, sin ningún tipo de control.
- Con variador de velocidad: Mantiene la temperatura de referencia constante mediante el PID del variador de velocidad que se explicará en el capítulo 8.

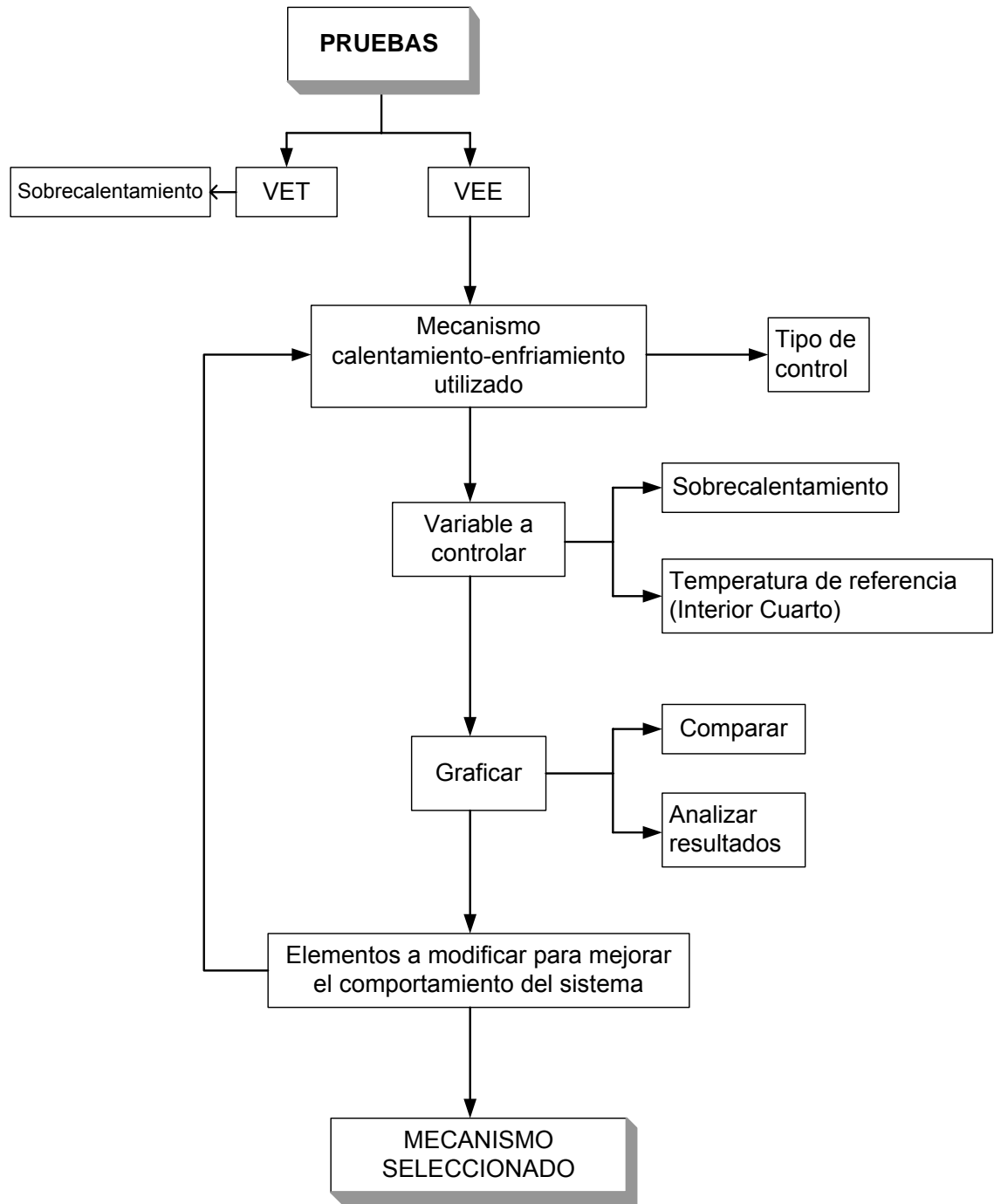
7. PRUEBAS

Las pruebas se realizaron en el Banco para Pruebas de Refrigeración con que cuenta el laboratorio de Plantas Térmicas de la Universidad Industrial de Santander.

Mediante una serie de ensayos se recolectan los datos de funcionamiento del sistema de refrigeración para luego hacer un análisis de resultados mediante gráficas que permitan comparar el desempeño de la válvula de expansión termostática convencional (VET) con la válvula de expansión electrónica (VEE) implementada en el cuarto frío.

En el diagrama presentado en la figura 55 muestra cada una de las etapas que se realizaron para finalmente seleccionar el mecanismo mas adecuado para el control del VEE. En primera instancia se encuentra la etapa de instalación del mecanismo calentamiento-enfriamiento (agua o aire) a controlar. Luego se selecciona las variables a controlar (sobrecalentamiento y temperatura de referencia) mediante el programa LabVIEW para posteriormente visualizar el comportamiento de dichas variables junto con todas las temperaturas del sistema de refrigeración. En seguida se encuentra la etapa de análisis de resultados para definir que situaciones son cambiadas o mejoradas para finalmente escoger el mecanismo más eficiente para el control de la VEE.

Figura 55. Proceso De Pruebas



Fuente: Autor

En el proceso de investigación se realizaron varias pruebas con los escenarios mencionados en el capítulo 6 como lo muestra la siguiente tabla 25.

Tabla 25. Condiciones de las pruebas de controlabilidad del sobrecalentamiento de acuerdo a las modificaciones en el sistema de control y/o la carga de sistema

	VEE						COMPRESOR		VET		
1	X					X	X				X
2	X					X	X				
3	X					X	X				
4	X				X	X	X				
5	X				X	X	X				
6	X				X	X	X		X		
7									X		X
8					X	X	X		X		
9					X	X	X		X		
10								X	X		X
11					X	X	X			X	
12					X	X	X			X	
13					X	X	X			X	

CARGA DEL SISTEMA

Perturbación 1 (abrir/cerrar puerta)
 Perturbación 2 (R3 y R4)
 Perturbación 3 (R1)

Fuente: Autor

Con Variador de Velocidad

7.1 PRUEBA 1: Comportamiento de la V.E.T y V.E.E. ante perturbaciones (Abrir y cerrar puerta).

Tabla 26. Condición de operación de la prueba 1 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VET _(A) y VET _(B)	
	VEE	Calentamiento-enfriam. con agua
		Máximo taraje
COMPRESOR	Sin variador de velocidad	
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1	

Fuente: Autor

PROCEDIMIENTO:

Se inicio el proceso controlando el grado de sobrecalentamiento con las válvulas de expansión termostaticas V.E.T_(A) y V.E.T_(B) durante los primeros 38 minutos, cuando alcanzo su estabilidad se efectuó una perturbación. Después se realizó un pre-calentamiento con agua al bulbo de la V.E.E. (ver figura 54) para permitir flujo de refrigerante a través de la misma válvula, después de tener una estabilidad en esta etapa de control a través de la V.E.E. se realizaron tres perturbaciones tipo 1. (gráfica 4)

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

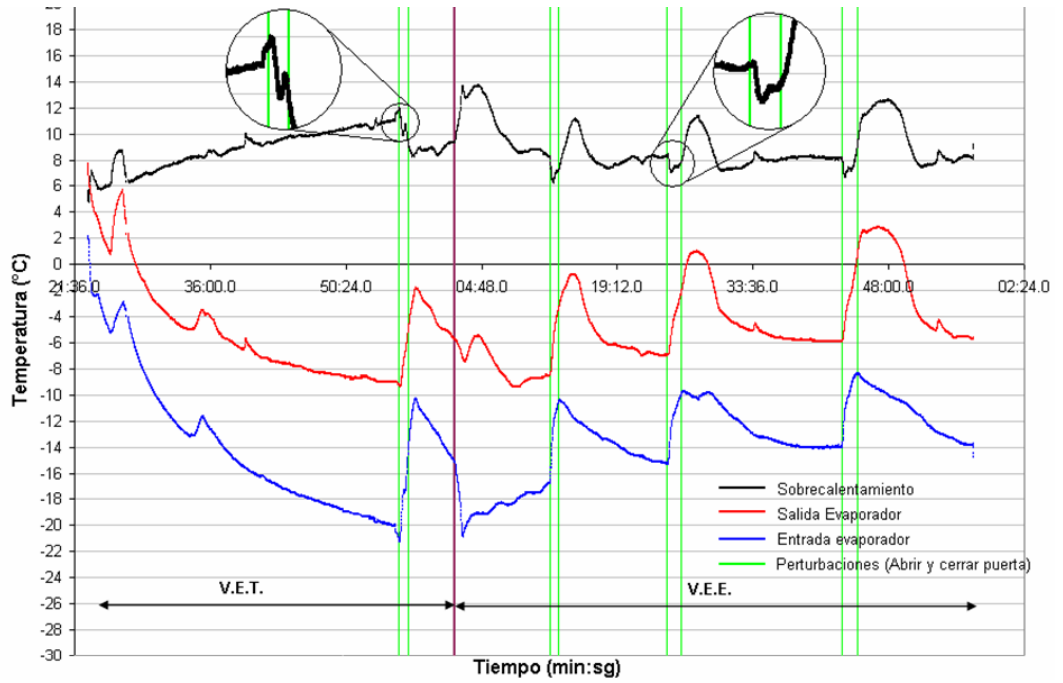
Para la V.E.T. el grado de sobrecalentamiento disminuye (ver figura 56), y la válvula se abre inmediatamente después de cerrar la puerta porque la temperatura evaporación (T_{ev}) aumenta en mayor proporción que la temperatura del bulbo (T_b);

$$T_b = T_{ev} + \text{Sobrecalentamiento};$$

$$\text{Sobrecalentamiento}_{VET} (\downarrow) = T_b - T_{ev} (\uparrow)$$

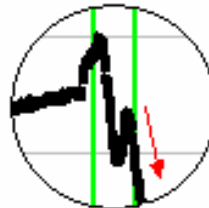
$$\text{Sobrecalentamiento}_{VET} = 9^{\circ}\text{C}$$

Gráfica 4. Comportamiento de la V.E.T. y V.E.E. con perturbaciones



Fuente: Autores del proyecto

Figura 56. Comportamiento de la V.E.T. a la perturbación



Fuente: Autores del proyecto

En la V.E.E. se comporta de manera contraria es decir el grado de sobrecalentamiento aumenta (ver figura 57), esto se debe a la disminución en la temperatura de evaporación inmediatamente después de cerrar la puerta en el cuarto frío.

$$T_b = T_{ev} + \text{Sobrecalentamiento};$$

$$\text{Sobrecalentamiento}_{VEE} (\uparrow) = T_b - T_{ev} (\downarrow)$$

$$\text{Sobrecalentamiento}_{VEE} = 13^\circ\text{C}$$

Figura 57. Comportamiento de la V.E.E. a la perturbación



Fuente: Autores del proyecto

7.2 PRUEBA 2: Comportamiento de la V.E.E. con dos perturbaciones al sistema

Tabla 27. Condición de operación de la prueba 2 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamiento con agua
		Máximo taraje
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1	

Fuente: Autores del proyecto

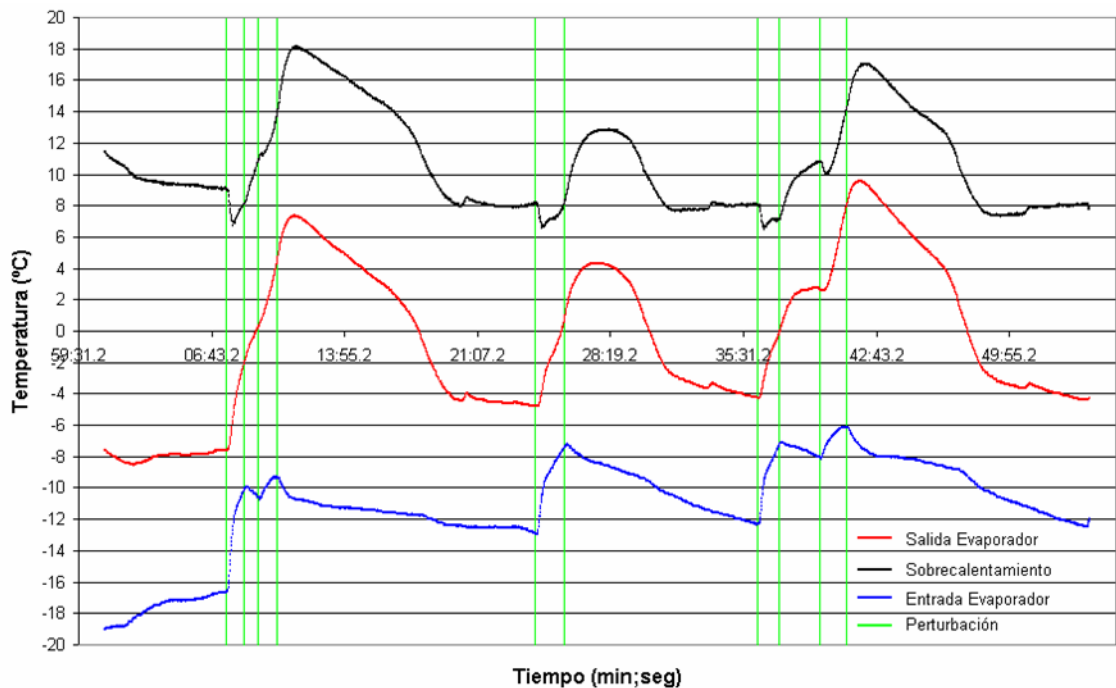
PROCEDIMIENTO:

Se realizó el mismo procedimiento de la prueba 1 pero con doble perturbación a la V.E.E.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

La V.E.E. tuvo un sobrecalentamiento muy alto (aproximadamente de 18°C), el cual es producto de la lenta respuesta al calentamiento del bulbo por medio del agua y a la tensión del resorte (416 kPa). Por lo tanto, la válvula no abre de forma eficiente y se presentan estos altos valores como lo muestra la gráfica 5.

Gráfica 5. V.E.E. con doble perturbación



Fuente: Autores del proyecto

7.3 PRUEBA 3: Comportamiento de la V.E.E. con aislamiento del tubo capilar del bulbo.

Tabla 28. Condición de operación de la prueba 3 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamiento con agua
		Máximo taraje
		Aislamiento del tubo capilar
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1	

Fuente: Autores del proyecto

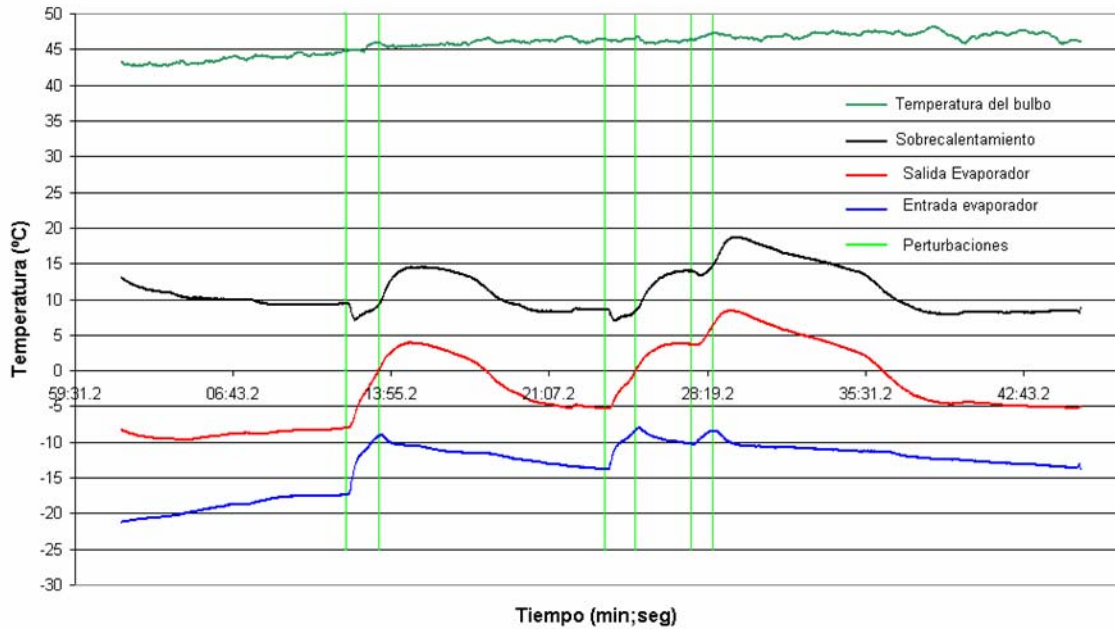
PROCEDIMIENTO:

Se instaló un recubrimiento a través de todo el tubo capilar del bulbo y se realizaron varias perturbaciones al sistema.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El propósito del aislamiento del tubo capilar del bulbo es obtener una respuesta más rápida de la válvula al cambio de temperatura en el bulbo, pero como lo muestra la grafica 6, la respuesta de la V.E.E a las perturbaciones no tuvo ningún cambio significativo en comparación a las pruebas 1 y 2. El sobrecalentamiento alcanzó valores de 14°C para una perturbación y 18°C para dos perturbaciones tipo 1.

Gráfica 6. V.E.E. con aislamiento del tubo capilar del bulbo



Fuente: Autores del proyecto

7.4 PRUEBA 4: Comportamiento de la V.E.E. ante la disminución del vástago de ajuste de la VEE.

Tabla 29. Condición de operación de la prueba 4 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamie. con agua
		Medio taraje
		Aislamiento del tubo capilar
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1	

Fuente: Autores del proyecto

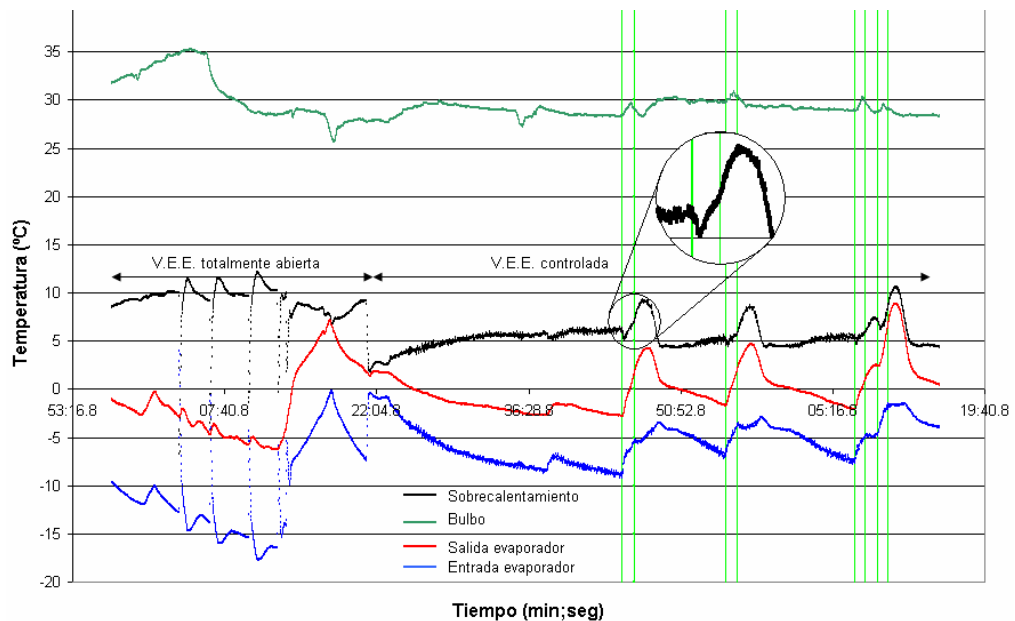
PROCEDIMIENTO:

Se realizaron tres giros al vástago de ajuste de la V.E.E. buscando disminuir la fuerza de empuje del resorte. Antes de encender el sistema se hizo un precalentamiento al bulbo con el propósito de abrir parcialmente la V.E.E. y tener un control sobre esta, para después desactivar las válvulas de expansión termostáticas convencionales ($VET_{(A)}$ y $VET_{(B)}$).

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Al iniciar el proceso la VEE se encuentra abierta debido a que el bulbo está a una temperatura de 35°C (ver gráfica 7), después de tener una V.E.E. controlada y realizar una perturbación se obtuvo un cambio significativo en la respuesta de la válvula, es decir el grado de sobrecalentamiento disminuyó notablemente (9°C) como lo resalta la gráfica 7.

Gráfica 7. V.E.E. con disminución del vástago de ajuste



Fuente: Autores del proyecto

7.5 PRUEBA 5: Comportamiento de la V.E.E. desde el arranque del sistema.

Tabla 30. Condición de operación de la prueba 5 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamiento con agua
		Medio taraje
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1	

Fuente: Autores del proyecto

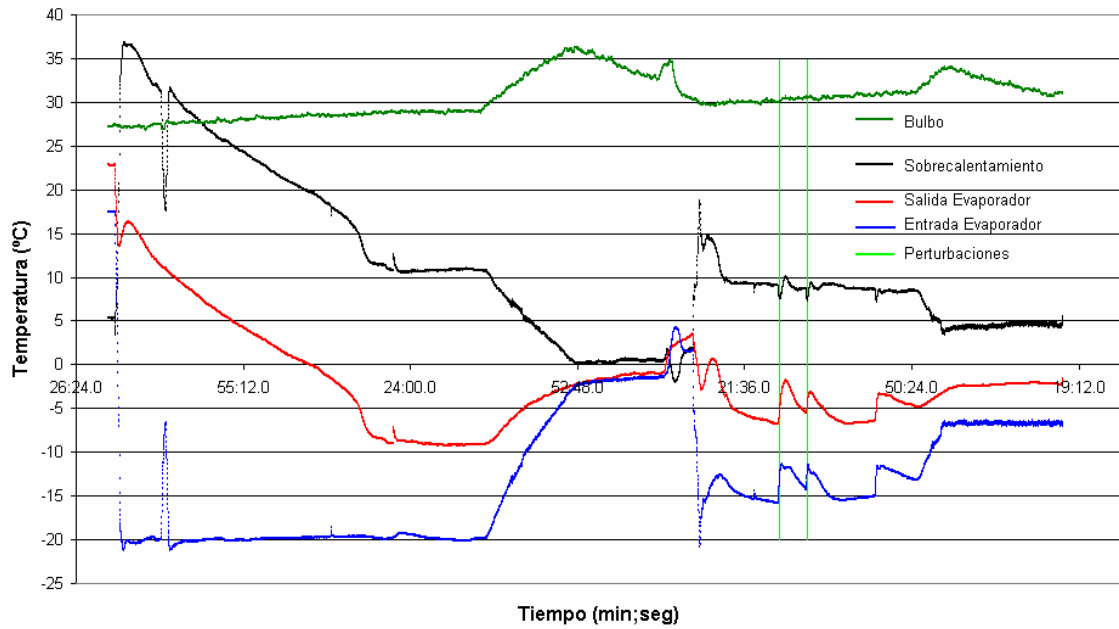
PROCEDIMIENTO:

Se comenzó a operar la V.E.E. desde el arranque del sistema. Después de lograr una estabilidad en el sobrecalentamiento, se realizó un calentamiento al bulbo para posteriormente realizar algunas perturbaciones tipo 1 y registrar su comportamiento.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

La válvula se encuentra parcialmente cerrada y el sobrecalentamiento sube inmediatamente hasta un valor de 36°C. Luego de alcanzar su estabilidad en 11°C (ver gráfica 8) se calentó el bulbo y la V.E.E. respondió de manera inmediata hasta alcanzar casi 1° de sobrecalentamiento. Esto quiere decir que al disminuir el taraje del resorte con el vástago de ajuste, y realizando el calentamiento del bulbo se obtuvo una mejor respuesta de la válvula.

Gráfica 8. Comportamiento de la V.E.E. desde el arranque del sistema



Fuente: Autores del proyecto

7.6 PRUEBA 6: Comportamiento de la V.E.E ante una perturbación con la resistencia eléctrica R1.

Tabla 31. Condición de operación de la prueba 6 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamiento con agua
		Medio taraje
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 3	

Fuente: Autores del proyecto

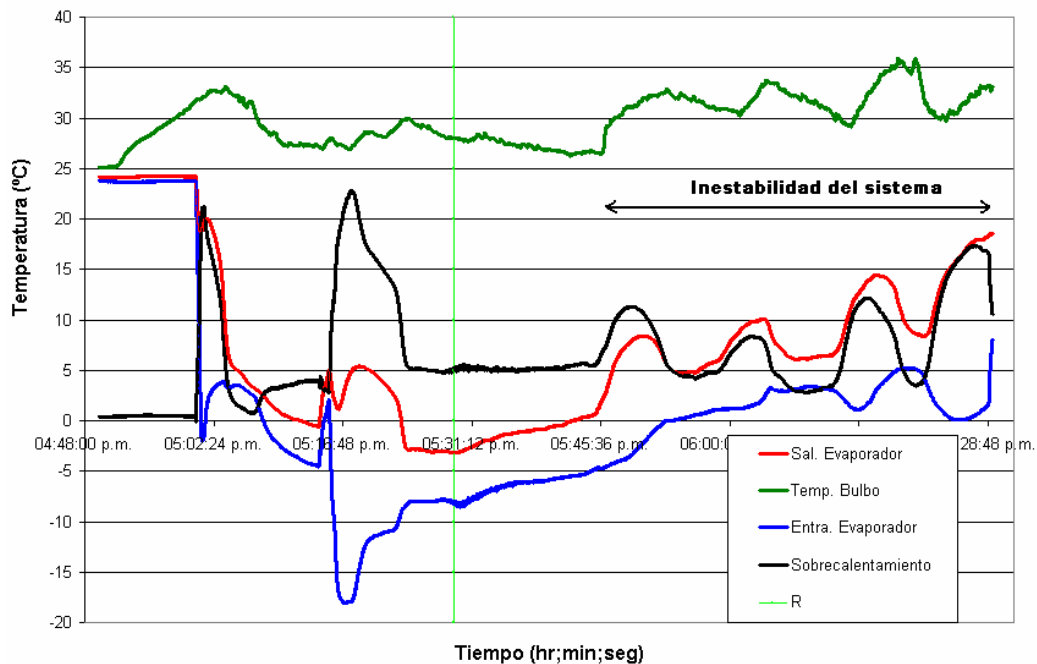
PROCEDIMIENTO:

Cuando la V.E.E. logró una estabilidad, se llevó a cabo una perturbación con la resistencia eléctrica R1=986W instalada dentro del cuarto frío.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

El sistema presenta sobrecalentamientos (pendulaciones) consecutivos (hasta 11°C), como lo muestra la gráfica 9 debido a la alta carga del sistema dada por la resistencia R1. Aunque la V.E.E. trata de controlar el grado de sobrecalentamiento, el sistema presenta inestabilidad después de un tiempo.

Gráfica 9. V.E.E. con una perturbación R1



Fuente: Autores del proyecto

7.7 PRUEBA 7: Comportamiento de la V.E.T. ante una perturbación con la resistencia eléctrica R1.

Tabla 32. Condición de operación de la prueba 7 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VET	
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 3	

Fuente: Autores del proyecto

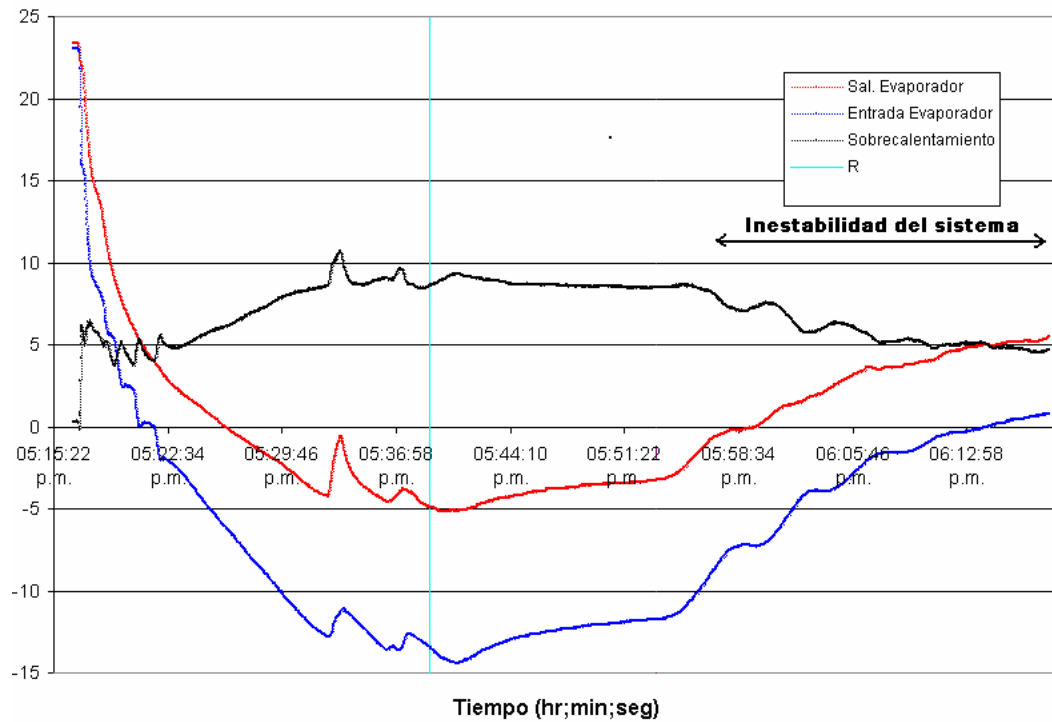
PROCEDIMIENTO:

Se hizo el mismo procedimiento de la prueba 6 pero el grado de sobrecalentamiento es controlado por las válvulas de expansión termostáticas VET_(A) y VET_(B).

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

El objetivo es comparar el comportamiento de la V.E.E. y la V.E.T. con la misma perturbación. Para este caso se observa un control más estable de las V.E.T. (ver grafica 10) y mantiene un sobrecalentamiento de 8°C. En cambio la V.E.E. presenta sobrecalentamientos altos.

Gráfica 10. V.E.T. con una perturbación R1



Fuente: Autores del proyecto

7.8 PRUEBA 8: Comportamiento de la V.E.E con mecanismo calentamiento-enfriamiento con aire.

Tabla 33. Condición de operación de la prueba 8 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamiento con aire
		Medio taraje
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 3	

Fuente: Autores del proyecto

PROCEDIMIENTO:

Se cambió el mecanismo de calentamiento-enfriamiento de agua por aire, donde el control se realiza de forma manual. Es decir, cuando se presenta un sobrecalentamiento mayor a 8°C se prende la resistencia y el ventilador por medio de un interruptor para observar la respuesta de la válvula.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Después que la V.E.E. encontró una estabilidad, se realizó una perturbación tipo 3 como muestra la gráfica 11. Al presentar un cambio en el sobrecalentamiento, éste se controló de manera inmediata y eficiente evitando los sobrecalentamientos altos en el sistema ya que la V.E.E. responde satisfactoriamente al calentamiento-enfriamiento por aire.

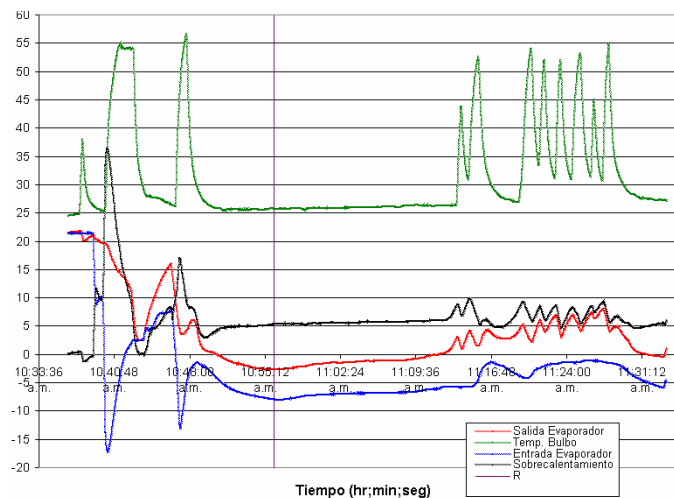
Ventajas:

- Respuesta inmediata de la válvula ante la perturbación.
- Buen control del grado de sobrecalentamiento.

Desventajas:

- Consumo de potencia elevada por la resistencia térmica (1350 W)

Gráfica 11. Sistema calentamiento-enfriamiento con aire de la V.E.E.



Fuente: Autores del proyecto

7.9 PRUEBA 9: Comportamiento de la V.E.E con mecanismo calentamiento-enfriamiento con aire y regulando el voltaje a la resistencia térmica.

Tabla 34. Condición de operación de la prueba 9 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamiento con aire
		Medio taraje
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1	

Fuente: Autores del proyecto

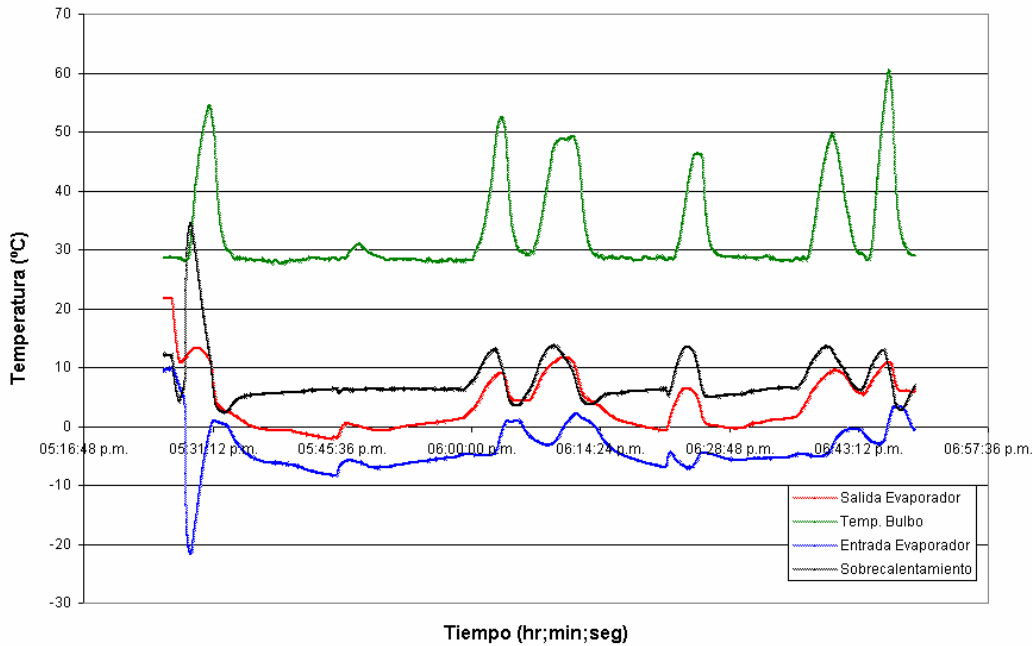
PROCEDIMIENTO:

Se hizo el mismo procedimiento anterior, pero regulando el voltaje hasta 80 voltios en la resistencia térmica, lo cual dependía de los requerimientos del sistema.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Para disminuir el consumo de energía presentado en la prueba 8 se regula el voltaje de la resistencia (ver gráfica 12). La respuesta de la V.E.E es más lenta y presenta sobrecalentamientos más pronunciados (hasta 12°C).

Gráfica 12. Calentamiento-enfriamiento con aire de la V.E.E.



Fuente: Autores del proyecto

7.10 PRUEBA 10: Comportamiento de la VET con variador de velocidad

Tabla 35. Condición de operación de la prueba 10 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VET	
	COMPRESOR	Con variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 3	

Fuente: Autores del proyecto

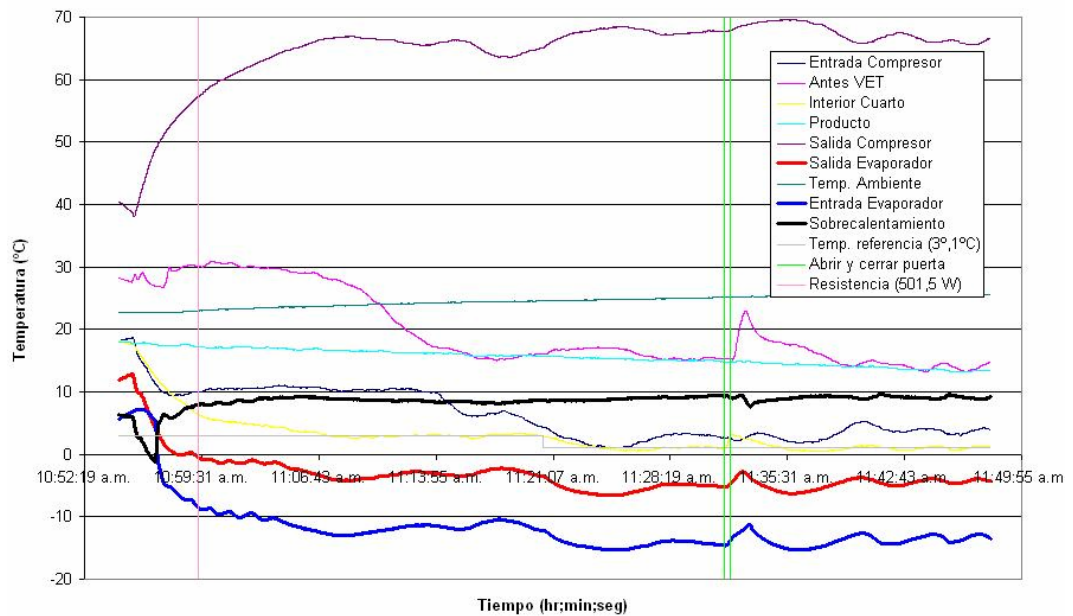
PROCEDIMIENTO:

Se graficaron todas las temperatura del sistema de refrigeración implementando el PID del variador de velocidad.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

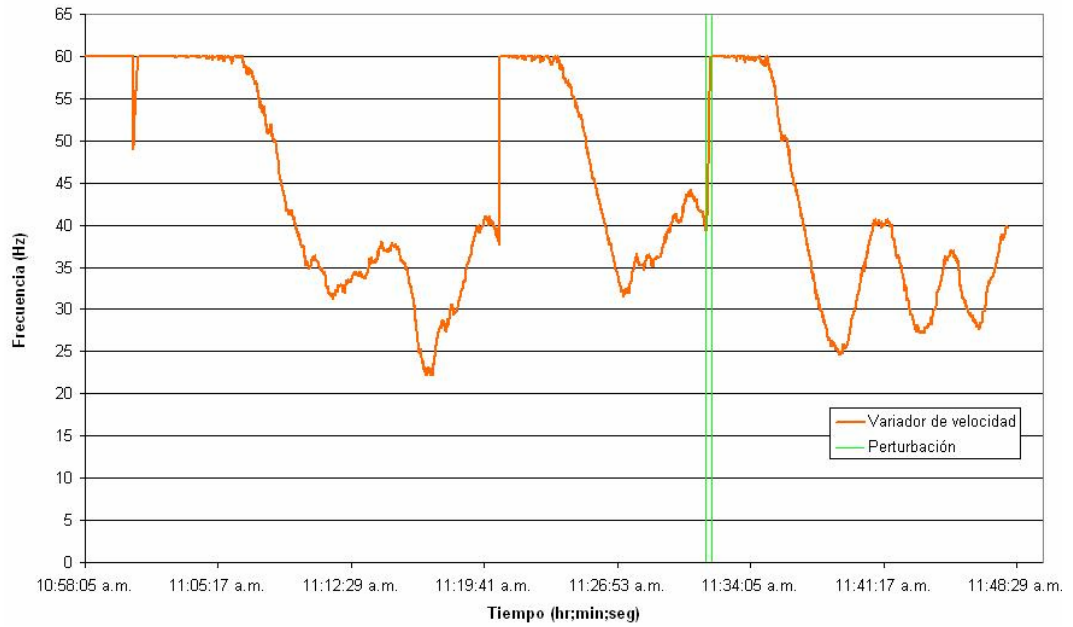
Al iniciar el sistema, la temperatura de referencia es de 3°C (Interior cuarto). Después de 30 minutos se disminuye la temperatura de referencia a 1°C y el variador de velocidad controla de manera eficiente la temperatura del interior del cuarto como lo muestran las gráficas 13 y 14.

Gráfica 13. VET con variador de velocidad



Fuente: Autores del proyecto

Gráfica 14. Frecuencia del variador de velocidad para la VET



Fuente: Autores del proyecto

7.11 PRUEBA 11: VEE con control PID de la resistencia térmica y el variador de velocidad.

Tabla 36. Condición de operación de la prueba 11 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamiento con aire
		Medio taraje
		PID Resistencia térmica
	COMPRESOR	Con variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1 y 2	

Fuente: Autores del proyecto

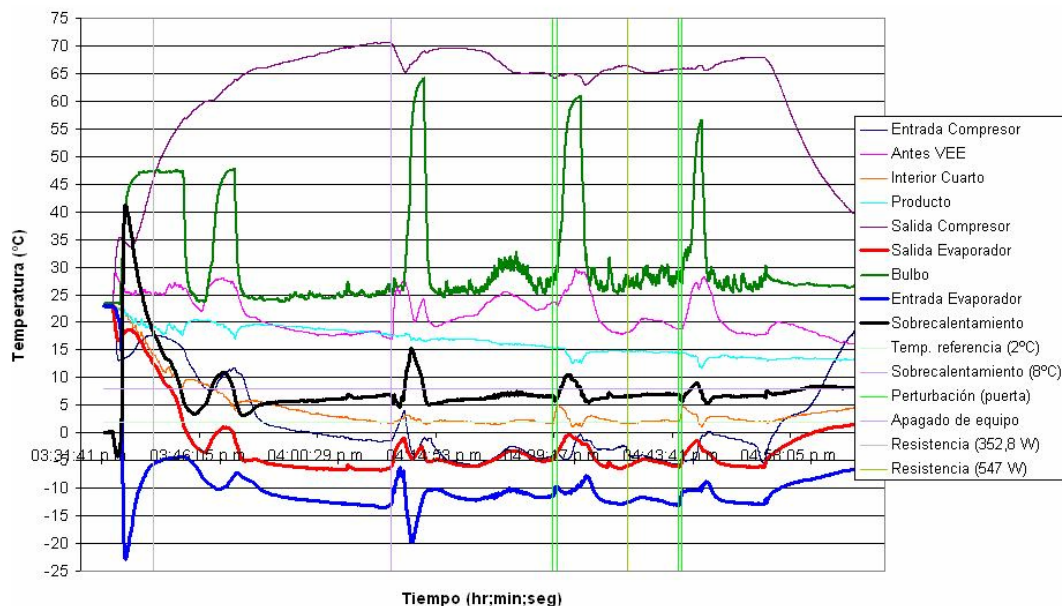
PROCEDIMIENTO:

Iniciado el proceso se suministró al sistema una carga de 352,8W. Después de una hora, ésta se aumentó a 547W. El proceso comenzó controlando una temperatura de referencia de 2°C por medio del PID del variador de velocidad y un grado de sobrecalentamiento de 8°C controlado por el PID de la resistencia térmica.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

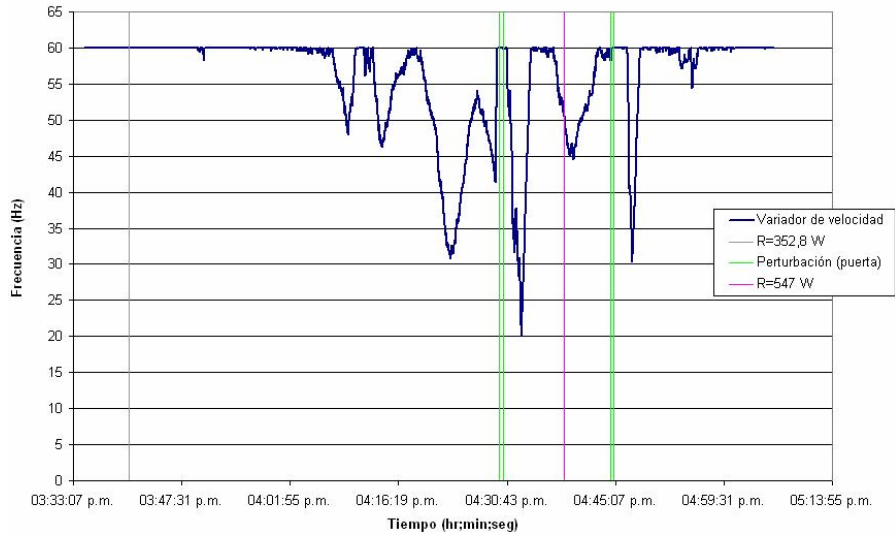
Durante el proceso la V.E.E. (ver gráficas 15 y 16) trata de mantener un grado de sobrecalentamiento de aproximadamente 5°C debido a la tensión del resorte, pero al realizarse una perturbación al sistema, el control PID de la resistencia térmica mantiene el sobrecalentamiento por debajo de 8°C.

Gráfica 15. VEE con PID de la resistencia y variador de velocidad



Fuente: Autores del proyecto

Gráfica 16. Variador de velocidad para la VEE



Fuente: Autores del proyecto

7.12 PRUEBA 12: VEE con variador de velocidad registrando el consumo de potencia de la resistencia térmica.

Tabla 37. Condición de operación de la prueba 12 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamie. con aire
		Medio taraje
		PID Resistencia térmica
	COMPRESOR	Con variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1	

Fuente: Autores del proyecto

PROCEDIMIENTO:

Se realizó el mismo procedimiento de la prueba 11, pero registrando el tiempo que la resistencia térmica dura encendida durante el todo proceso como lo muestra la gráfica 17 y 18.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

El programa LabVIEW registra el tiempo que la resistencia térmica se mantiene encendida durante todo el proceso como son;

El tiempo total de encendido de la resistencia térmica = 1257 seg. (20,95 min.)

Tiempo total de la prueba = 53 min; 39 seg.

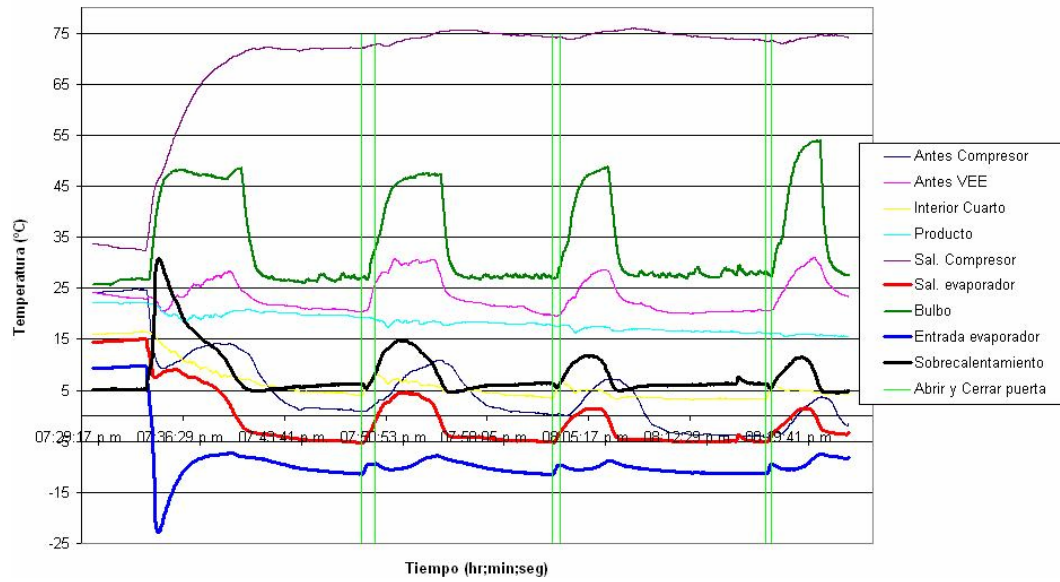
Consumo de potencia del ventilador = 2,5 Watts

Potencia de la resistencia = 170 Watts

Esto quiere decir que el consumo promedio de la resistencia térmica en todo el proceso es de 66,70 Watts.

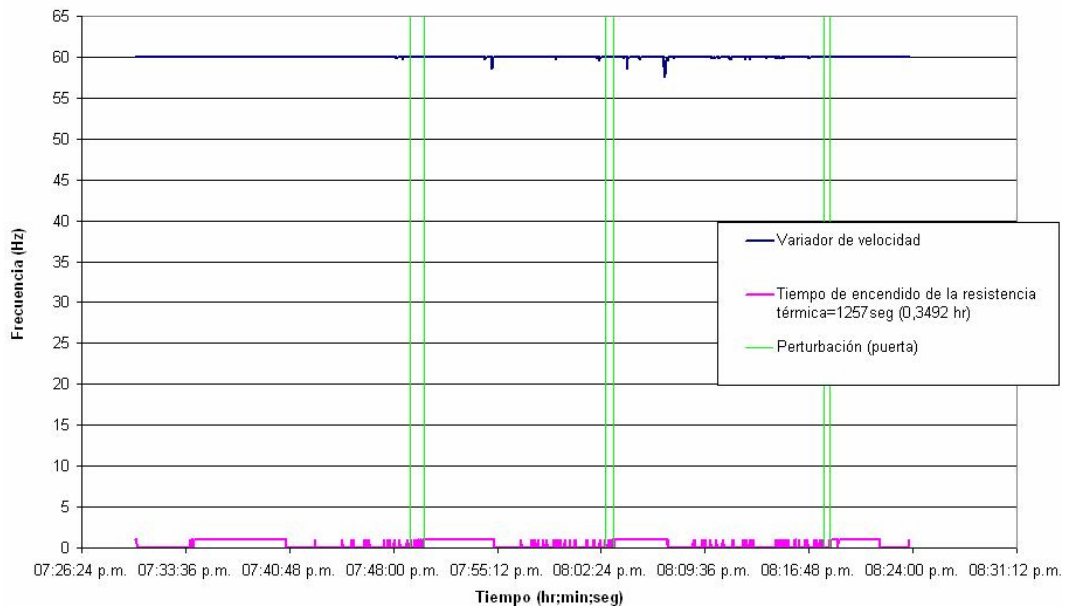
CONSUMO TOTAL DE POTENCIA = 66,70 Watts + 2,5 Watts = 69,20 Watts

Gráfica 17. VEE y consumo de potencia de la resistencia térmica



Fuente: Autores del proyecto

Gráfica 18. Variador de velocidad y tiempo de encendido de la resistencia térmica



Fuente: Autores del proyecto

7.13 PRUEBA 13: VEE sin variador de velocidad registrando el consumo de potencia de la resistencia térmica.

Tabla 38. Condición de operación de la prueba 13 respecto de la carga y el sistema de control

SISTEMA DE CONTROL	VEE	Calentamiento-enfriamie. con aire
		Medio taraje
		PID Resistencia térmica
	COMPRESOR	Sin variador de velocidad
CARGA DEL SISTEMA	Perturbación 1 y 2	

Fuente: Autores del proyecto

PROCEDIMIENTO:

Se realizó el mismo procedimiento de la prueba 12, pero sin variador de velocidad.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Las gráficas 19 y 20 muestra que la temperatura del cuarto frío (temperatura de referencia) desciende sin ningún tipo de control hasta -1°C . Luego se realizaron perturbaciones al sistema (abrir y cerrar puerta) para observar el comportamiento del control PID de la resistencia térmica el cual mantiene el sobrecalentamiento por debajo de 8°C .

El tiempo total de encendido de la resistencia térmica = 881 seg. (14,68 min.)

Tiempo total de la prueba = 47 min; 10 seg

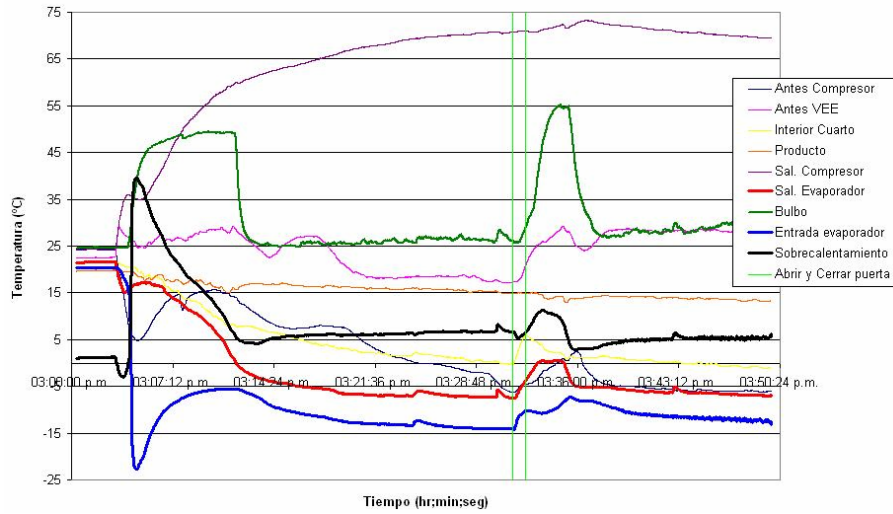
Consumo de potencia del ventilador = 2,5 Watts

Potencia de la resistencia = 170 Watts

Esto quiere decir que el consumo promedio de la resistencia térmica sin variador de velocidad en todo el proceso es de 52,10 Watts.

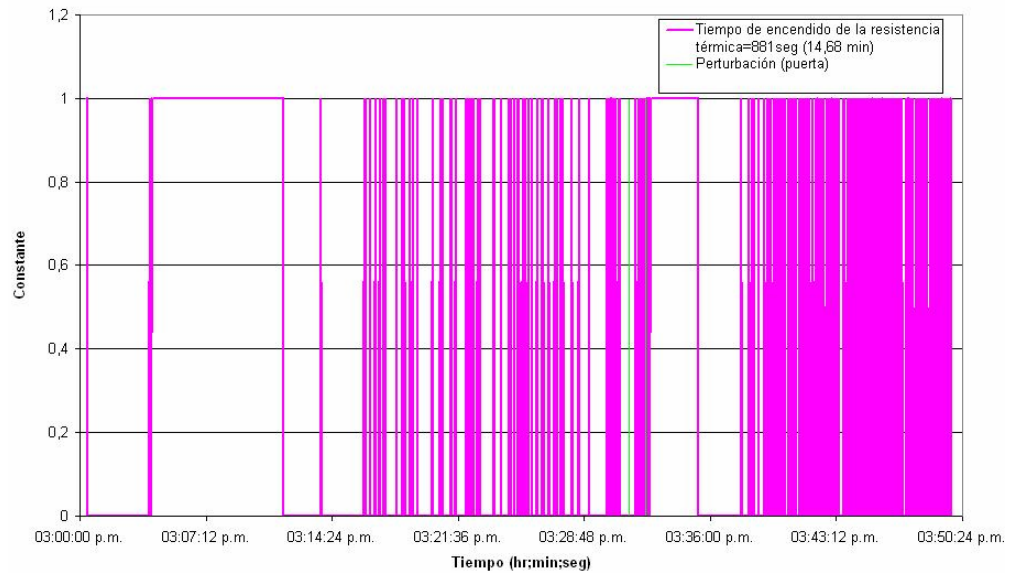
CONSUMO TOTAL DE POTENCIA = 52,10 Watts + 2,5 Watts = 54,60 W

Gráfica 19. VEE sin variador de velocidad registrando el consumo de potencia de la resistencia térmica.



Fuente: Autores del proyecto

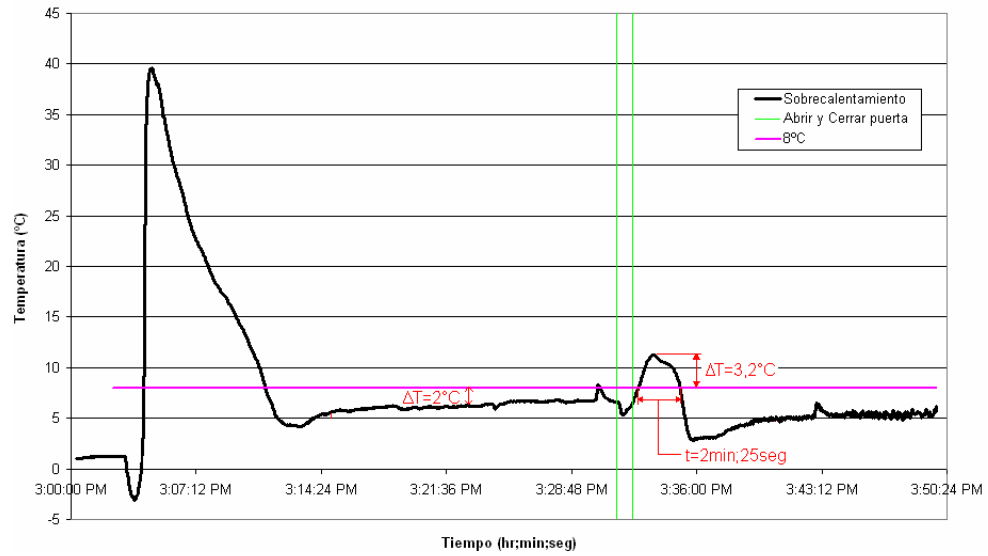
Gráfica 20. Consumo de potencia de la resistencia térmica



Fuente: Autores del proyecto

7.14 Sobrecalentamiento presentados en la VET y VEE. Se registra la temperatura (overshoot) y el tiempo que toma la válvula en volver al grado de sobrecalentamiento seleccionado, como lo muestran las figuras 21, 22, 23 y 24.

Gráfica 21. Sobrecalentamiento de la VEE sin variador de velocidad



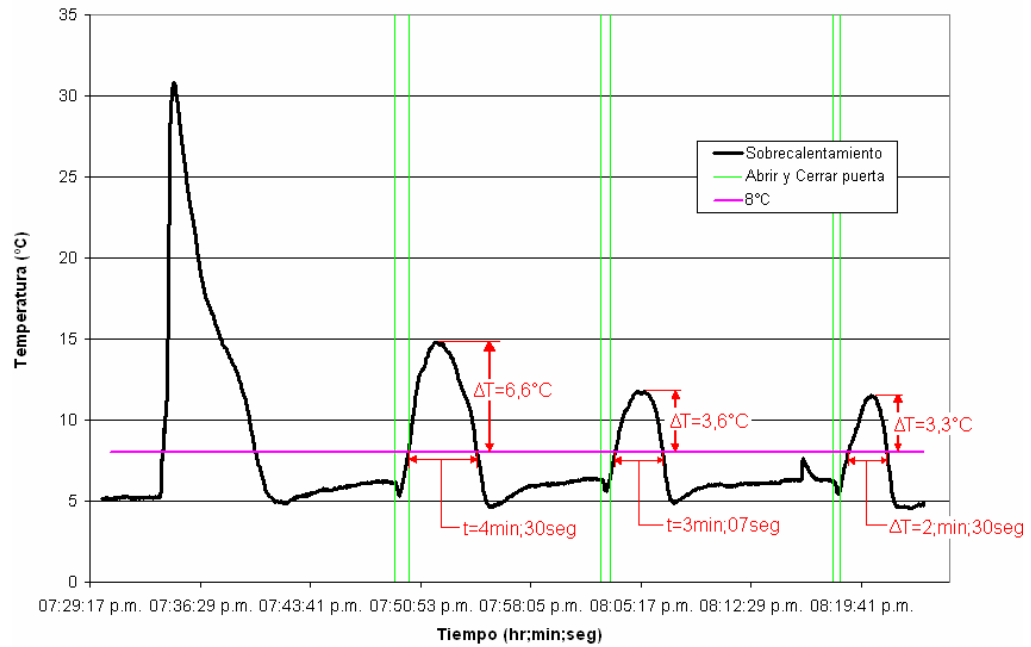
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 39. Respuesta de la VEE sin variador de velocidad ante las perturbaciones

	Sin variador de velocidad		
	Overshoot	Tiempo	Referencia de sobrecalentamiento
VEE	3,2°C	2min;25seg	8°C

Fuente: Autores del proyecto

Grafica 22. Sobrecalentamiento de la VEE con variador de velocidad



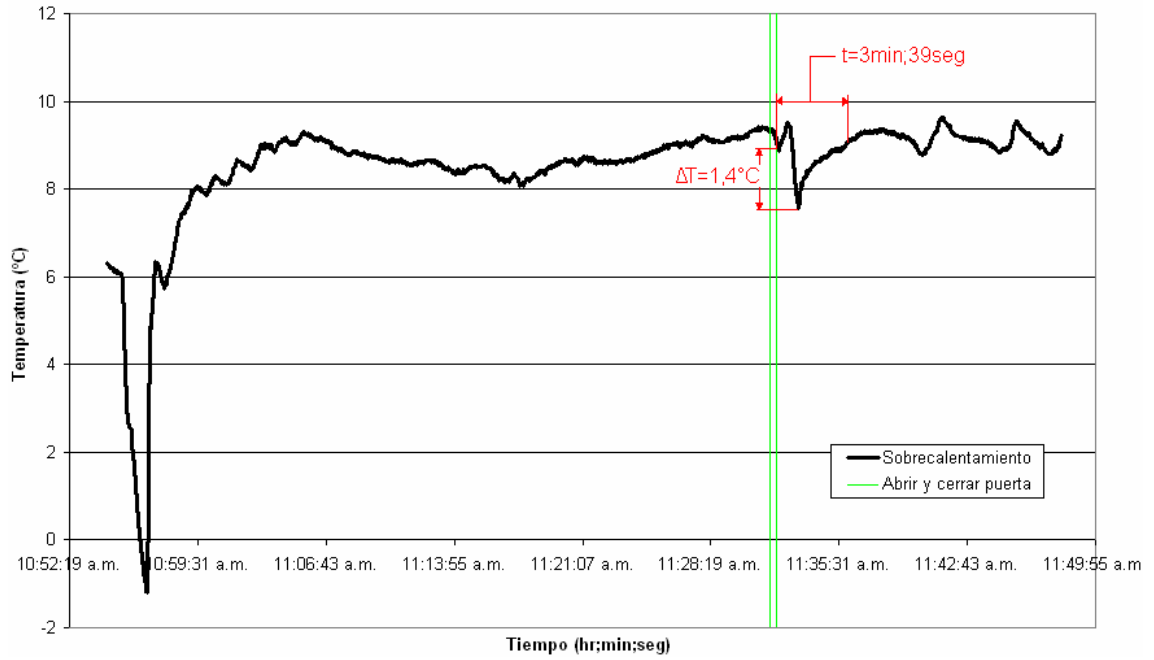
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 40. Respuesta de la VEE con variador de velocidad ante las perturbaciones

	Con variador de velocidad		
	Overshoot (promedio)	Tiempo (promedio)	Referencia de sobrecalentamiento
VEE	4,5°C	3min;22seg	8°C

Fuente: Autores del proyecto

Gráfica 23. Sobrecalentamiento VET con variador de velocidad



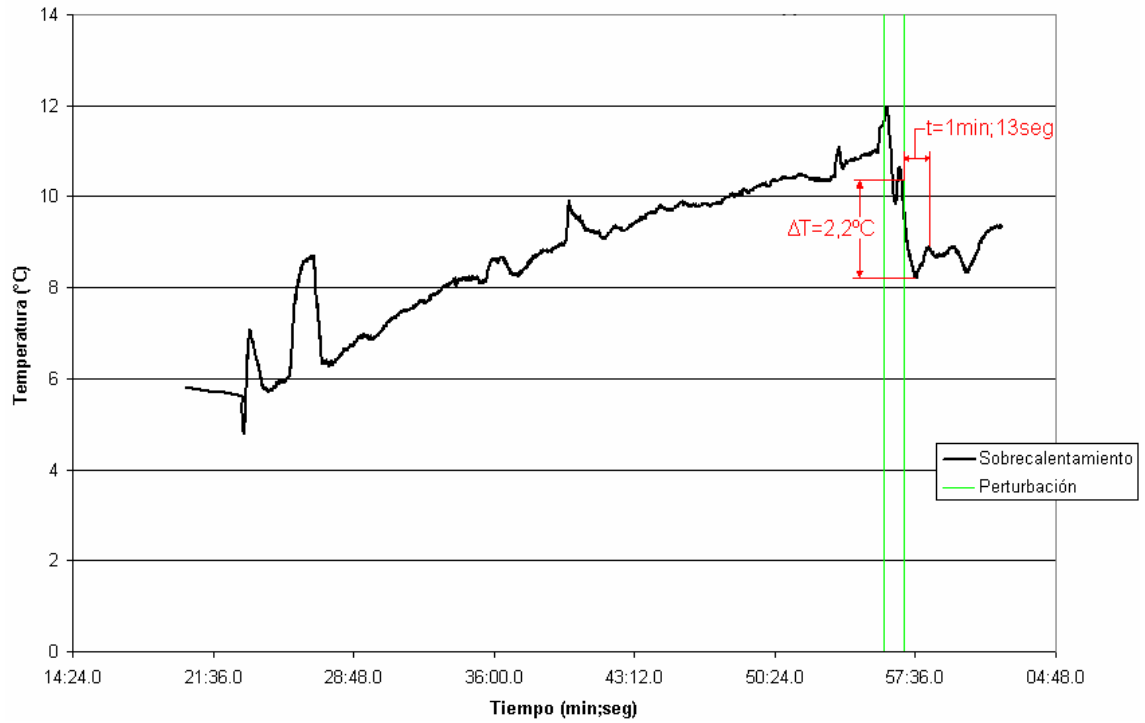
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 41. Respuesta de la VET con variador de velocidad ante las perturbaciones

	Con variador de velocidad	
VET	Overshoot	Tiempo
	1,4°C	3min;39seg

Fuente: Autores del proyecto

Grafica 24. Sobrecalentamiento de la VET sin variador de velocidad



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 42. Respuesta de la VET sin variador de velocidad ante las perturbaciones

	Sin variador de velocidad	
VET	Overshoot	Tiempo
	2,2°C	1min;13seg

Fuente: Autores del proyecto

8. CONTROLADOR DESDE EL COMPUTADOR

El control de sistemas físicos por computador se hace cada vez más común en la industria debido al incremento en la flexibilidad de los programas de control. Los principales requerimientos para el desarrollo de esta aplicación son;

- Hardware de control y adquisición de datos
- Dispositivo de procesamiento central, en este caso un computador personal del laboratorio para procesar los datos adquiridos.
- Software para la aplicación de control. Para esto se desarrolló un programa en LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) de National Instruments, que le permite enlazar las diferentes señales adquiridas por hardware con un entorno amigable para los usuarios en el computador.

LabVIEW es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el *lenguaje C* o *BASIC*. Sin embargo, LabVIEW se emplea la programación gráfica o *lenguaje G* para crear programas basados en diagramas de bloques.

A continuación se describe el programa principal para esta aplicación, ejecutada desde el computador

8.1 PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal para el control de la resistencia térmica, motor del ventilador, variador de velocidad y temperaturas de todo el proceso reúne las siguientes características;

- Interfase con el usuario.
- Visualización de las señales de entrada y de las acciones de control generadas mediante gráficos en pantalla.
- Registro continuo de las señales de entrada y salida, para tener un seguimiento histórico del comportamiento del sistema.

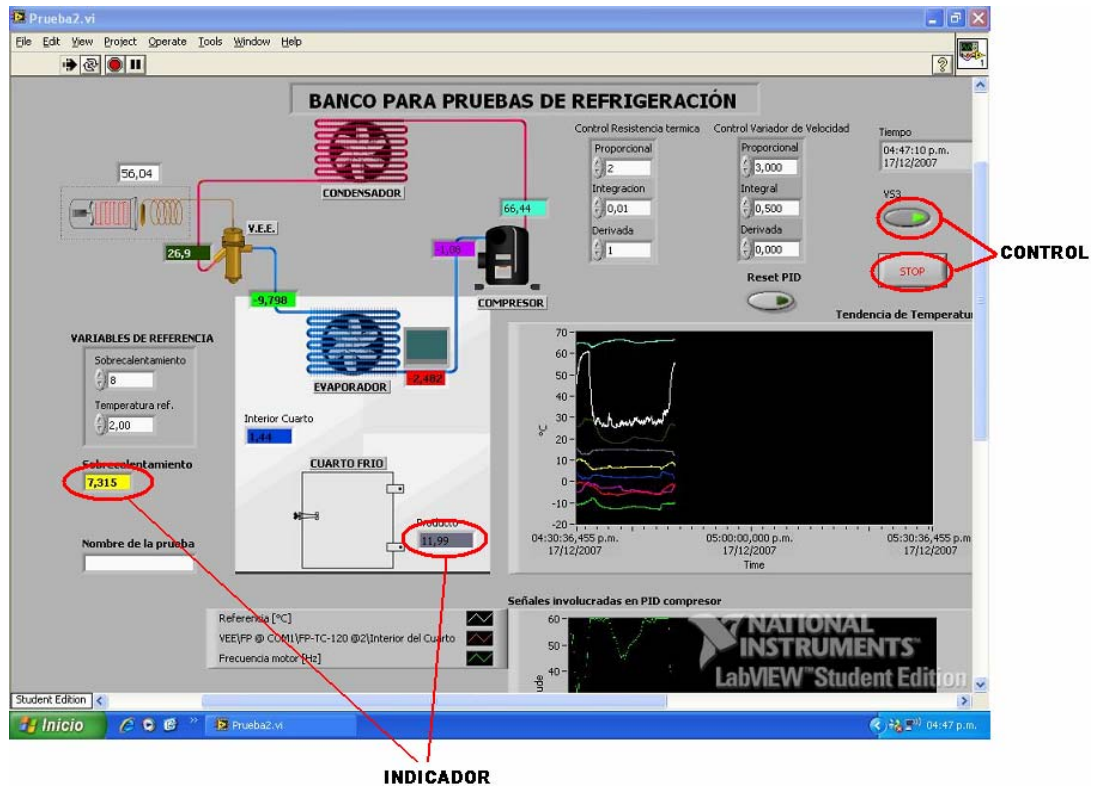
8.1.1 Interfase con el usuario

El panel frontal del banco para pruebas de refrigeración se muestra en la figura 58. En este panel frontal se puede observar el progreso de las variables controladas (Sobrecalentamiento y temperatura de referencia) mediante gráficos e indicadores numéricos. Mediante los controles es posible fijar los valores de las variables de referencia que el usuario quiera determinar.

8.1.1.1 Panel frontal

Al iniciar el programa se muestra la ventana principal que es el panel frontal donde se esquematiza el sistema de refrigeración y se muestran los valores instantáneos de las temperaturas del refrigerante en cada uno de los sitios donde fueron instaladas las termocuplas, también nos da las lecturas de la temperatura del bulbo y el grado de sobrecalentamiento en tiempo real graficándolas para tener una mejor interpretación del comportamiento del sistema.

Figura 58. Ventana principal del software



Fuente: Autores del proyecto

Básicamente se desarrolló el siguiente enlace de control;

- Monitoreo y gráfica con todas las temperaturas del sistema de refrigeración y el grado de sobrecalentamiento
- PID del variador de velocidad
- PID de la resistencia térmica
- Guarda todos los datos en el programa Excel

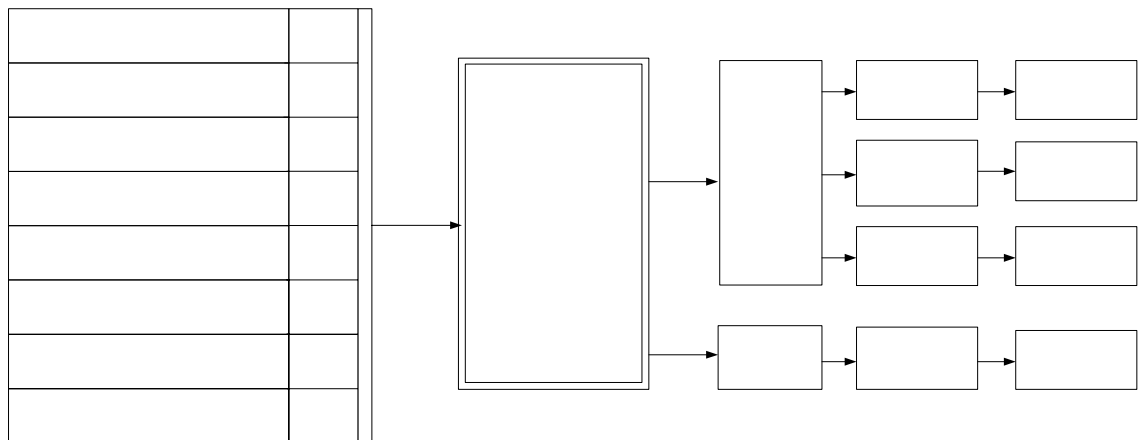
8.1.1.2 Diagrama de bloque

El diagrama de bloques constituye el código fuente del VI. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesamiento de las entradas y salidas que se crearon en el panel

frontal. Los controles e indicadores que se colocaron previamente en el Panel Frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los terminales.

Se representa este diagrama de bloque en un esquema de programación grafica del control (figura 59), donde las termocuplas sensan la temperatura de los componentes del sistema de refrigeración y a través de la programación realizada se convierten en señales continuas y discretas que controlan dispositivos mecánicos.

Figura 59. Esquema de la programación grafica del control

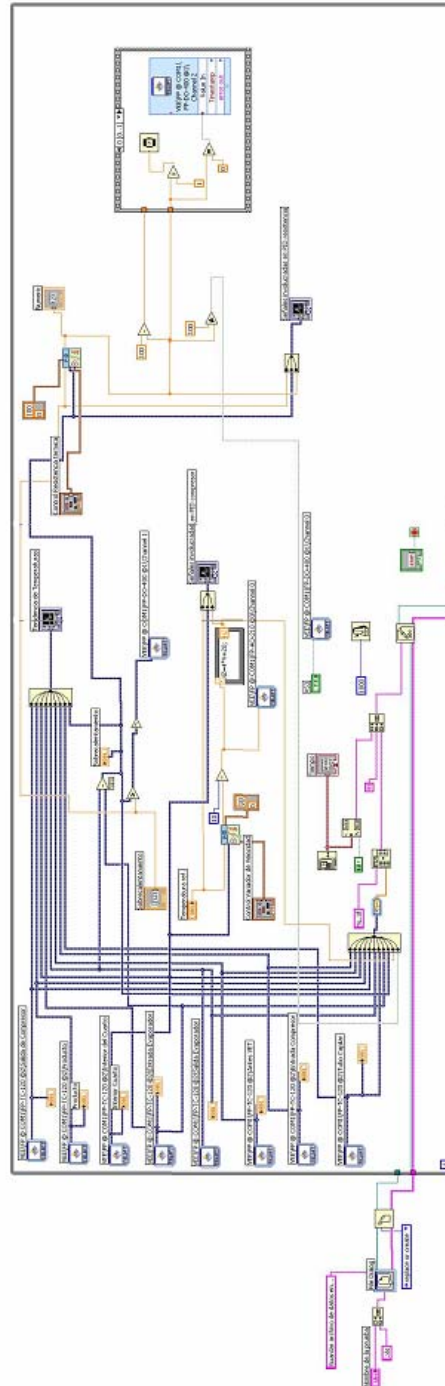


Fuente: Autores del proyecto

A continuación se presenta nuestro diagrama de bloque:

FP TC 120 Ch 0 OUT COMPRESOR	T 1
FP TC 120 Ch 1 INTERIOR DEL CUARTO	T 2
FP TC 120 Ch 2 IN COMPRESOR	T 3
FP TC 120 Ch 3 PRODUCTO	T 4
FP TC 120 Ch 4	T 5

Figura 60. Diagrama de bloque



Fuente: Autores del proyecto

8.1.1.3 Paletas de LabVIEW

Las paletas de LabVIEW proporcionan las herramientas que se requieren para crear y modificar tanto el panel frontal como el diagrama de bloques (gráfica 25).

Existen algunas paletas como:

Gráfica 25 Algunas paletas de LabVIEW

Fuente: Autores del proyecto

Lee o es

Gráfico

In

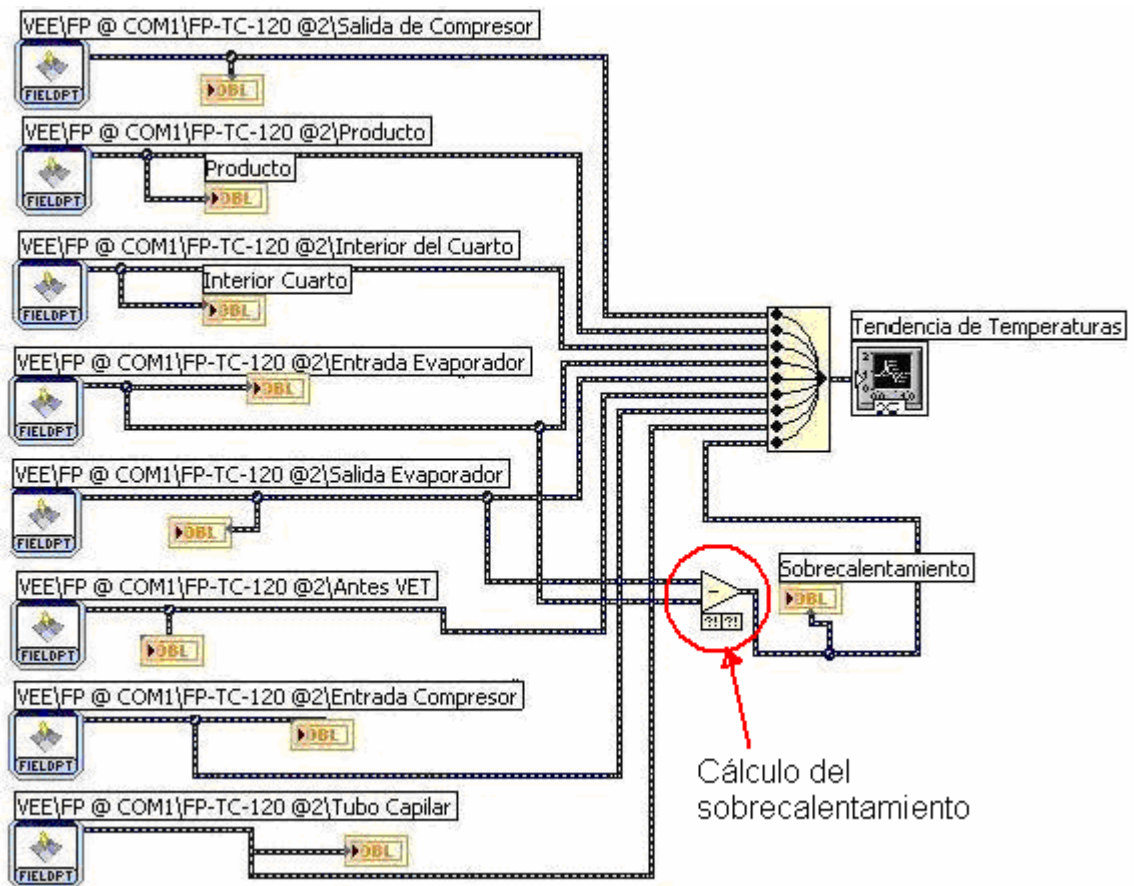
Muestra

Para la im

8.1.2 Grafica de las temperaturas en todo el proceso. A través de las termocupas se realiza la lectura de todas las temperaturas por medio del módulo FP-TC-120 y también el cálculo del grado de sobrecalentamiento:

$$\text{Sobrecalentamiento} = \text{Temp. Salida Evaporador} - \text{Temp. Entrada Evaporador}$$

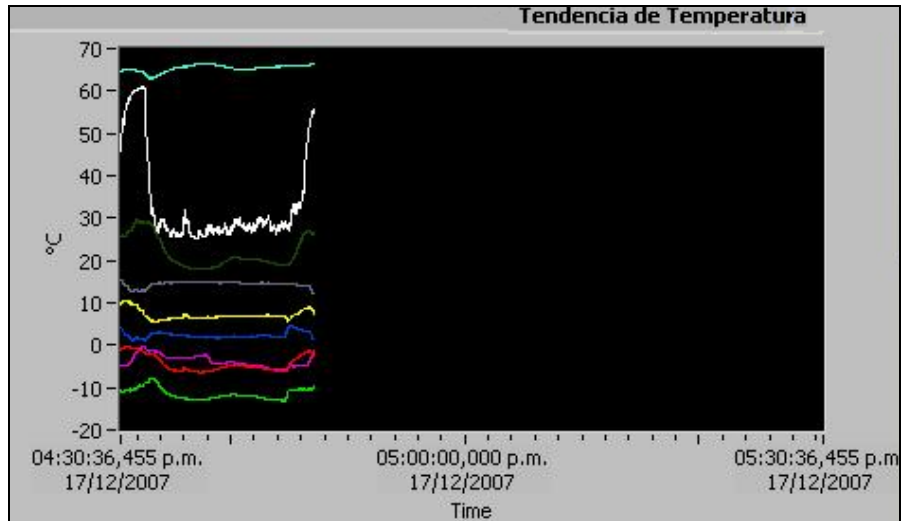
Grafica 26. Visualización de las temperaturas del cuarto frío



Fuente: Autores del proyecto

En la siguiente figura 61 se grafica en el panel frontal todas las temperaturas y sobrecalentamiento en tiempo real para que los estudiantes observen el comportamiento de todo el sistema de refrigeración del cuarto frío.

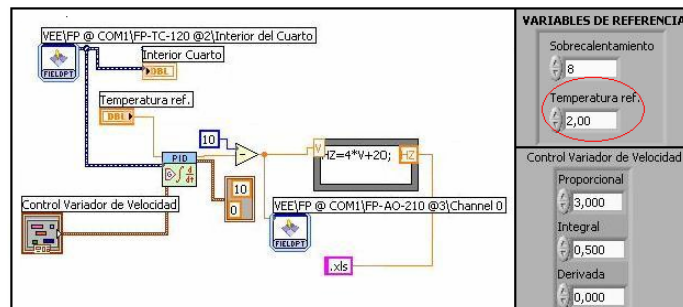
Figura 61. Tendencia de temperaturas en el panel frontal



Fuente: Autores del proyecto

8.1.3 PID Variador de velocidad. Este control depende de la temperatura de referencia que introduce el usuario mediante la ventana variables de referencia (ver figura 62) que es la temperatura del interior del cuarto a controlar. El enlace se realiza a través del módulo FP-AO-210 que envía la señal proporcional de 0-20mA a los bornes del variador de velocidad para regular la frecuencia de alimentación del compresor.

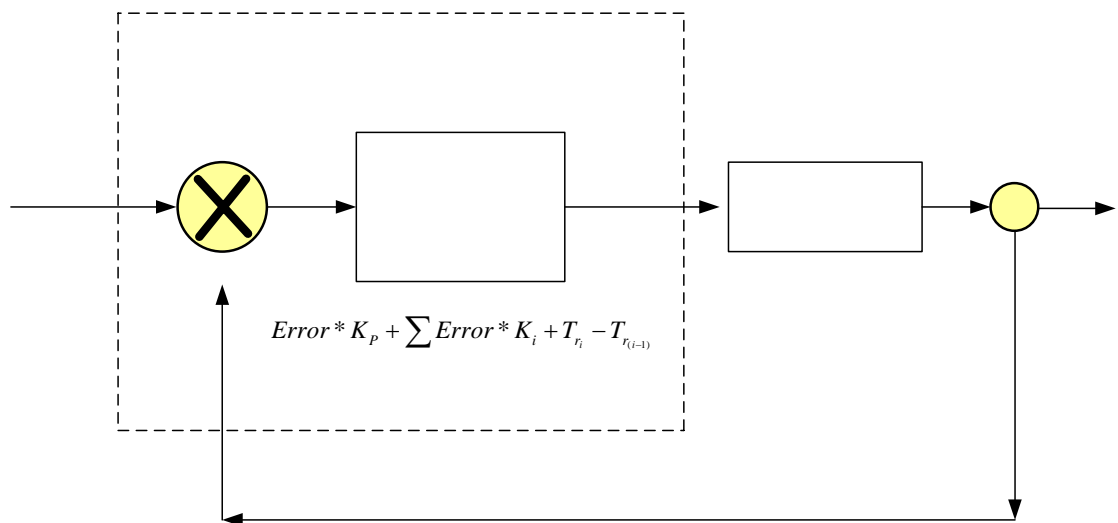
Figura 62. Control variador de velocidad



Fuente: Autores del proyecto

La estrategia de control continuo es un sistema de lazo cerrado (ver figura 63), la cual compara el valor de la temperatura del interior del cuarto (temperatura controlada) con la temperatura de referencia (en este caso la temperatura de referencia corresponde exactamente a la temperatura la cual se desea mantener la temperatura en el ambiente interior del cuarto), determina la desviación (error) y produce una acción de control que reducirá la desviación a cero o a un valor muy pequeño.

Figura 63. Control PID variador de velocidad



Fuente: Autores del proyecto

El tipo de acción que mejor se adecua a las características y requerimientos de la estrategia de control continuo es la acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta acción de control, es implementada a través de un software de control que es el encargado de comparar el valor medido de la temperatura controlada con el valor de la temperatura de referencia y determinar una señal de error que representa la diferencia entre el valor medido y el valor deseado, en relación a esta señal de error el software de control genera una acción de control proporcional-integral-derivativa (PID) que alimenta a un dispositivo corrector final

Temperatura
de referencia

Software de co

ACCI
CON
F

(variador de velocidad) que es el encargado de disminuir la diferencia de temperaturas a cero.

El ajuste de las ganancias proporcional K_p , integral K_i , derivativa K_d para el controlador automático PID se hizo experimentalmente buscando la mejor respuesta por parte del sistema a posibles perturbaciones de la temperatura del interior del cuarto frío tales como el ingreso de personas al ambiente refrigerado o un aumento en la temperatura del medio ambiente exterior (ver figura 64).

Figura 64. Programación de la acción PID en el software de control

$$\begin{aligned}
 C_p &= K_p * error; \\
 C_i &= C_i + K_i * error; \\
 C_d &= K_d * (T_{\text{interior cuarto}} - T_{\text{anterior}}) / tiempo; \\
 T_{\text{anterior}} &= T_{\text{interior cuarto}}; \\
 \text{Valor de control} &= C_p + C_i - C_d \\
 K_p &= 3 \text{ Ganancia Proporcional} \\
 K_i &= 0,1 \text{ Ganancia Integral} \\
 K_d &= 0 \text{ Ganancia Derivativa}
 \end{aligned}$$

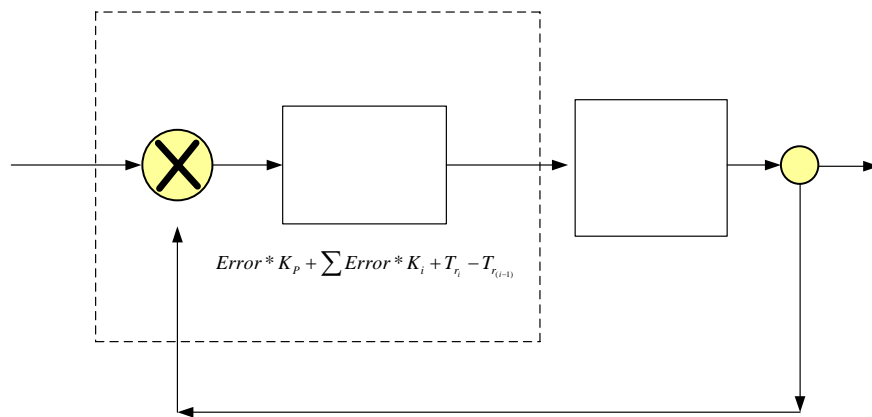
Fuente: Autores del proyecto

El control derivativo en las aplicaciones de refrigeración en estado estable no es necesario ya que la rapidez con la que se dan los cambios de temperatura en el interior del cuarto frío la mayor parte del tiempo es muy baja y si además consideramos la demora en la respuesta de los sensores de temperatura

(termocuplas) la rapidez resulta aun menor, lo cual produce que la ganancia derivativa tenga un valor muy pequeño todo el tiempo.

8.1.4 PID Resistencia térmica. El control consiste (ver figura 65) en comparar el valor del sobrecalentamiento con el valor del sobrecalentamiento de referencia dado por el usuario, luego determina la desviación (error) y produce una acción de control que reducirá la desviación a cero o a un valor muy pequeño.

Figura 65. Control PID Resistencia Térmica



Fuente: Autores del proyecto

El ajuste de las ganancias proporcional K_p , integral T_i , derivativa T_d para el controlador automático PID se hizo experimentalmente buscando la mejor respuesta por parte del sistema. La variable de salida corresponde a una señal PWM (ver figura 66).

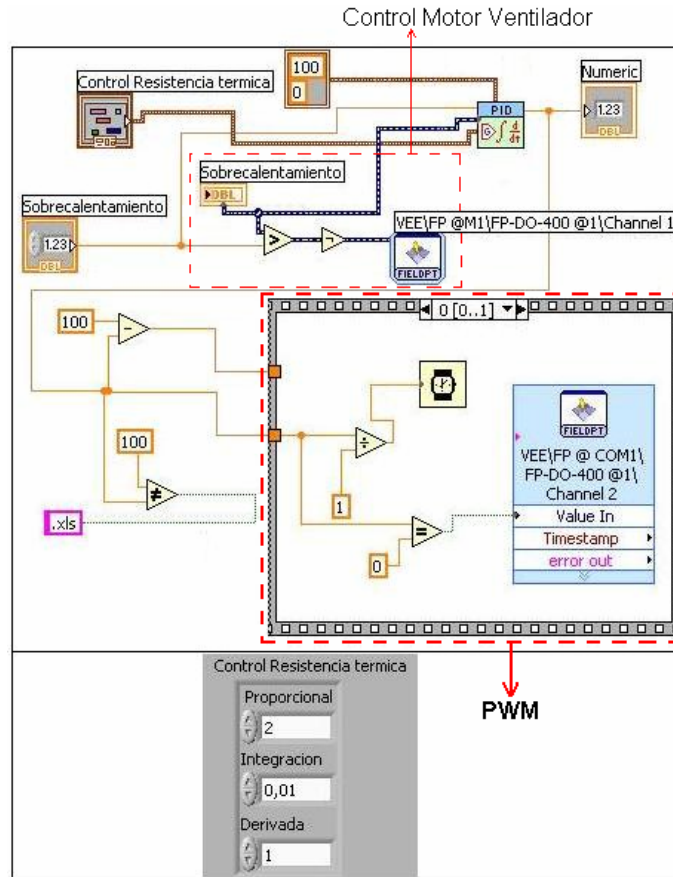
Software de

Sobrecalentamiento_{ref}

AC
CC

Sobreca. – Sobreca. Ref

Figura 66. Control resistencia térmica



Fuente: Autores del proyecto

Control Motor Ventilador

Si Sobrecalentamiento > Sobrecalentamiento (referencia) = 1

Si Sobrecalentamiento < Sobrecalentamiento (referencia) = 0

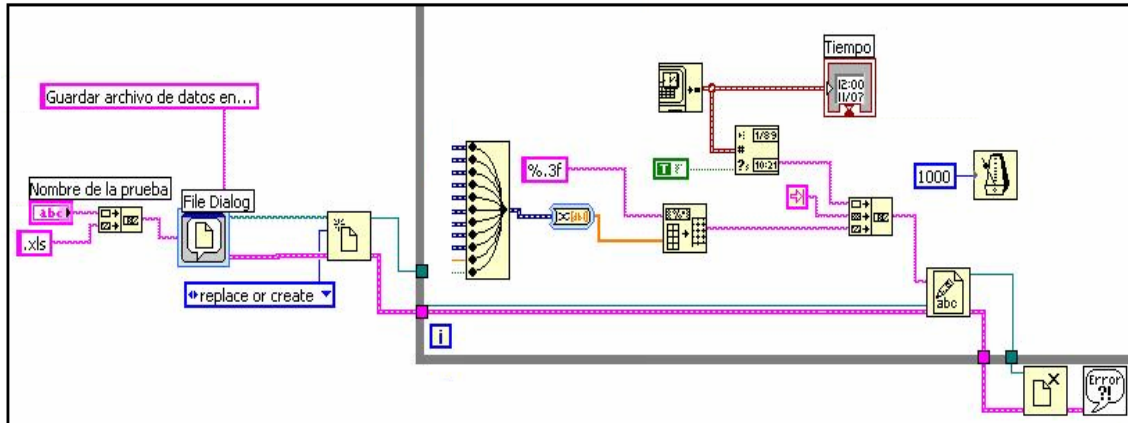
Tabla 43. Voltaje suministrado al Motor del Ventilador

Valor	Voltaje suministrado al Motor
0	3 voltios (min. velocidad)
1	7 voltios (máx. velocidad)

Fuente: Autores del proyecto

8.1.4.1. Datos en Excel. Registra todos los datos en Microsoft Excel, incluidos la frecuencia del variador de velocidad, tiempo de encendido de la resistencia térmica y la hora de duración de la prueba (ver figura 67 y 68).

Figura 67. Almacenamiento de datos en Microsoft Excel



Fuente: Autores del proyecto

Figura 68. Datos registrados en Excel

Microsoft Excel - Libro1												
Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ? Adobe PDF												
Escriba una pregunta												
Arial 10												
L35												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	HORA	Antes Compresor	Antes VEE	Interior Cui	Producto	Sal. Compre	Sal. Evapor	Bulbo	Entr. Evapor	Sobrecalent	Frecuencia	Tiempo res. T
2	08:00:17 p.m.	0.911	21.424	4.023	17.969	74.623	-4.911	27.152	-11.043	6.132	60	0
3	08:00:18 p.m.	0.911	21.455	4.023	18	74.623	-4.911	27.339	-11.043	6.132	60	0
4	08:00:19 p.m.	0.911	21.455	4.023	17.969	74.529	-4.911	27.463	-11.043	6.132	60	0
5	08:00:20 p.m.	0.817	21.455	4.023	17.969	74.56	-4.942	27.432	-11.074	6.132	60	0
6	08:00:21 p.m.	0.817	21.486	4.086	18	74.56	-4.911	27.432	-11.043	6.132	60	0
7	08:00:22 p.m.	0.817	21.486	4.023	18	74.56	-4.911	27.401	-11.043	6.132	60	0
8	08:00:23 p.m.	0.786	21.486	4.023	18	74.56	-4.911	27.401	-11.074	6.163	60	0
9	08:00:24 p.m.	0.786	21.549	4.023	18	74.529	-4.911	27.339	-11.074	6.163	60	0
10	08:00:25 p.m.	0.786	21.549	4.023	18	74.529	-4.911	27.307	-11.074	6.163	60	0
11	08:00:26 p.m.	0.755	21.549	4.023	18	74.529	-4.911	27.245	-11.074	6.163	60	0
12	08:00:27 p.m.	0.724	21.58	4.023	18	74.498	-4.911	27.152	-11.074	6.163	60	0
13	08:00:28 p.m.	0.724	21.611	3.992	18	74.498	-4.911	27.089	-11.074	6.163	60	0
14	08:00:29 p.m.	0.661	21.58	3.992	18	74.498	-4.911	27.058	-11.074	6.163	60	0
15	08:00:30 p.m.	0.661	21.611	3.992	18	74.498	-4.911	27.058	-11.074	6.163	60	0
16	08:00:31 p.m.	0.661	21.58	3.992	18.031	74.498	-4.911	27.058	-11.074	6.163	60	0
17	08:00:32 p.m.	0.661	21.58	3.992	18	74.498	-4.911	27.089	-11.074	6.163	60	0
18	08:00:33 p.m.	0.661	21.58	3.992	18	74.498	-4.911	27.089	-11.074	6.163	60	0
19	08:00:34 p.m.	0.661	21.58	3.992	18	74.529	-4.911	27.089	-11.074	6.163	60	0
20	08:00:35 p.m.	0.661	21.58	3.992	18	74.529	-4.942	27.089	-11.074	6.132	60	0
21	08:00:36 p.m.	0.661	21.58	3.992	18	74.529	-4.911	27.058	-11.074	6.163	60	0
22	08:00:37 p.m.	0.63	21.58	3.992	18	74.529	-4.911	27.058	-11.136	6.226	60	1

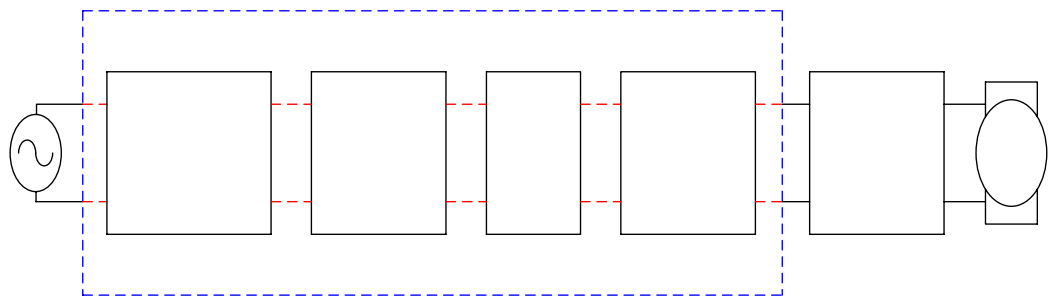
8.2 DISEÑO DEL HARDWARE PARA EL BANCO PARA PRUEBAS DE REFRIGERACIÓN

El control de la temperatura es ampliamente utilizado en varios procesos industriales. A continuación se desarrolla un control PID capaz de regular la energía entregada a un elemento (resistencia térmica) para mantener su temperatura en rangos preestablecidos. También se controla el motor del ventilador que suministra el flujo de aire para enfriar o calentar el bulbo dependiendo de los requerimientos del sistema.

8.2.1 Esquema del motor del ventilador

Este sistema físicamente consta de un motor que se puede alimentar hasta 12 voltios. La finalidad de este control (ver figura 69) es suministrar dos voltajes.

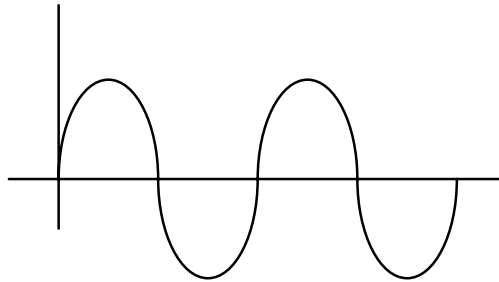
Figura 69. Esquema del motor del ventilador



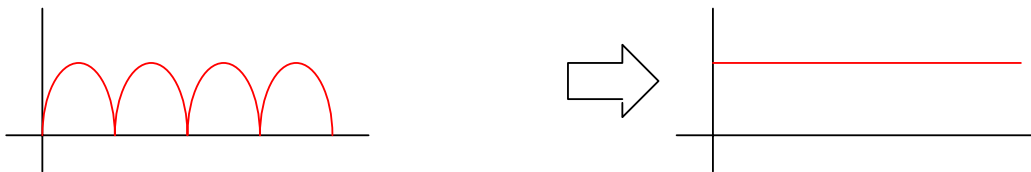
Fuente: Autores del proyecto

Diferentes al motor del ventilador para obtener dos velocidades de flujo de aire de la siguiente forma:

1) Alimentación por medio del tablero de control a $120 V_{AC}$



2) Transforma la señal AC en DC mediante la Fuente DC compuesto por el transformador, puente rectificador y filtros.



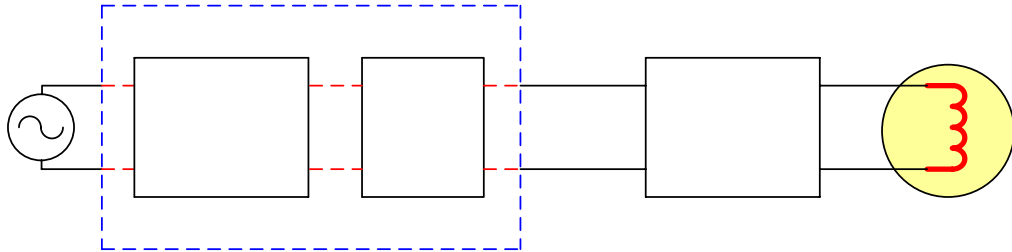
3) Mediante el regulador de voltaje se determinan los dos voltajes de control para el motor del ventilador

8.2.2 Esquema de la resistencia térmica

Para la resistencia térmica la fuente de alimentación de $120 V_{AC}$ se transforma en $170 V_{DC}$ (ver figura 70) que suministrar el calor necesario al bulbo y controla el grado de sobrecalentamiento programado.

Puente
rectificador

Figura 70. Esquema de la resistencia térmica



Fuente: Autores del proyecto

Fuente DC

La finalidad de este control es que la energía entregada a la resistencia térmica se regula alcanzando el sobrecalentamiento establecido y se mantiene aproximadamente constante, aun cuando ocurren perturbaciones dentro del cuarto frío.

120 V_{AC}

Puente rectificador

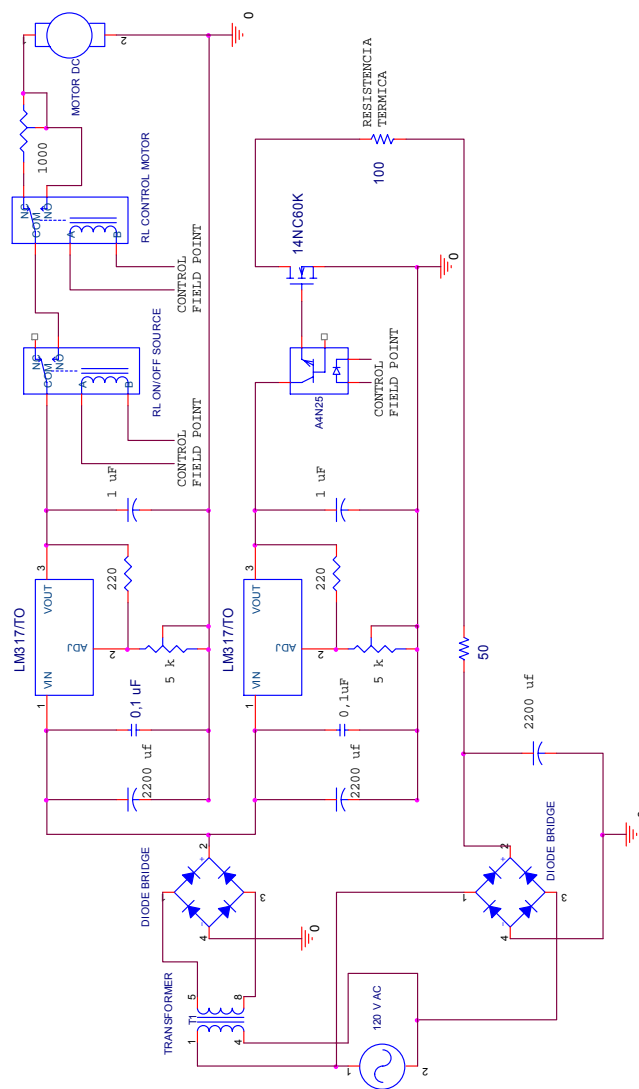
Para el desarrollo de este proyecto se construyó un sistema electrónico modular, en primera instancia dos módulos. El primer módulo es la tarjeta experimental para el control PID de la resistencia térmica y el motor del ventilador, que agrupa dispositivos digitales y analógicos (ver figura 71). Se compone de los siguientes elementos;

- 1 Transformador
- 2 Puentes rectificadores
- 2 Reguladores de voltaje
- 2 Relés
- 1 Optoacoplador
- 1 Mosfet

La tarjeta de control consta de 3 fuentes alimentados por la red eléctrica las cuales dos de ellas posee un transformador que alimenta a una etapa de rectificación que a su vez es conducido a dos reguladores de voltaje que regula el motor del

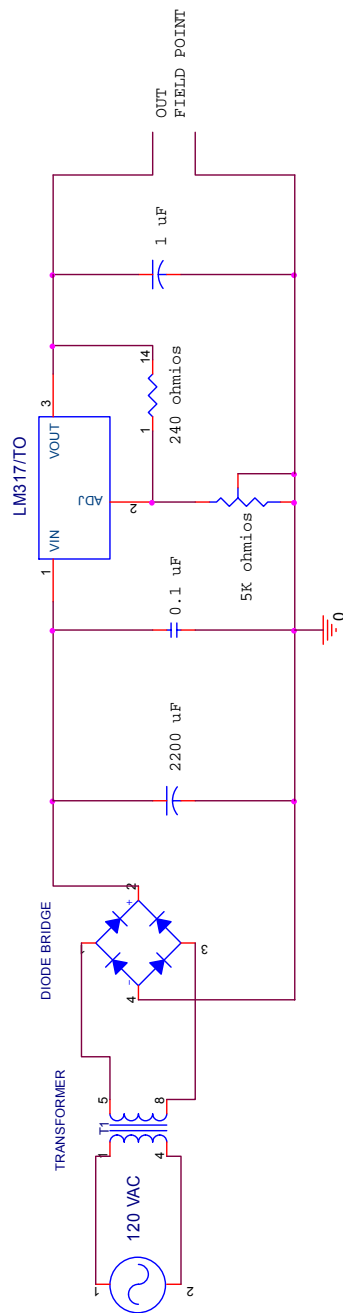
ventilador. La segunda etapa es utilizada para la conmutación del mosfet. La tercera fuente consta de un puente rectificador que está alimentado directamente de la red eléctrica (120v) para alimentar la resistencia térmica conectada al mosfet. El segundo módulo es la fuente de alimentación del FieldPoint (ver figura 72).

Figura 71. Tarjeta de control de la resistencia térmica y ventilador



Fuente: Autores del proyecto

Figura 72. Tarjeta de alimentación del FieldPoint



Fuente: Autores del proyecto

8.3 COSTOS DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICA Y LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN TERMOSTÁTICA CON CONTROL ELECTRÓNICO

Se selecciona una válvula de expansión electrónica tipo Danfoss con las siguientes especificaciones (Anexo A);

Refrigerante: R134a

Temperatura de evaporación (T_{ev}): 4 a 9°C

Capacidad: 1,5 TR

Válvula: Danfoss tipo AKV 10-5

Tabla 44. Valor en el mercado de la válvula de expansión electrónica y la válvula de expansión termostática con control electrónico.

	VÁLVULA DANFOSS TIPO AKV 10-5	VÁLVULA DE EXPANSIÓN TERMOSTÁTICA CON CONTROL ELECTRÓNICO
Cuerpo de la válvula	554.000	120.000
Accesorios de control; transmisor AKS32R, coil, Plug conexión 4P, display EKA 162, cable conexión EKA, reloj tiempo real EKA 172, sensor AKS12	3'290.000	
Accesorios de control; Tarjeta de control, fuente de alimentación al FieldPoint, resistencia térmica, motor ventilador.		110.000
COSTO TOTAL	\$3'844.000	\$230.000

CONCLUSIONES

- Con la realización del presente trabajo de grado, se logró diseñar e implementar a partir de una válvula de expansión termostática, una válvula de expansión de flujo de refrigerante con control electrónico, que cumple con los requerimientos básicos para su funcionamiento en un sistema de refrigeración.
- Se realizaron diferentes modificaciones de la VET sobre el bulbo y el resorte mejorando el tiempo de respuesta de apertura y cierre de la válvula. Las pruebas se realizaron dentro y fuera del sistema de refrigeración.
- La selección del sistema de calentamiento-enfriamiento esta determinada por el mejor comportamiento en cuanto a requerimientos de energía para calentar el fluido por un lado y la velocidad de transferencia de calor del fluido hacia el bulbo por otro, siendo este comportamiento como se muestra en la siguiente tabla:

	Agua	Aire
Energía requerida para elevar la temperatura	Alta	Baja
Eficiencia de transferencia de calor hacia el bulbo	Alta	Media

Para ahorrar energía predomina el sistema de mas bajo requerimiento de energía, por esta razón se seleccionó al aire como el mecanismo mas adecuado de calentamiento-enfriamiento.

- Se identificaron los diferentes elementos que constituyen un circuito de refrigeración, sus principales características y funcionalidad, de igual manera los dispositivos de control y mando, para lograr que el estudiante planifique proyectos en el banco para pruebas de refrigeración.
- Se diseñó y elaboró un programa en LabVIEW que a través de un hardware requerido (tarjeta de control y FieldPoint), registra las temperaturas sensadas por las termocuplas, y por medio de un control PID mantiene el grado de sobrecalentamiento de la VEE y la temperatura de evaporación a través del variador en rangos estipulados por el usuario.
- Se comparó el comportamiento del grado de sobrecalentamiento desde el arranque del sistema y durante la operación de la VEE y la VET con algunas perturbaciones al cuarto frío, donde presentaron los siguientes valores;

	Válvulas en operación					
	Sin variador de velocidad			Con variador de velocidad		
	Overshoot	Tiempo	Ref.	Overshoot	Tiempo	Ref.
VET	2,2°C	1min;13s	5-8°C	1,4°C	3min;39s	5-8°C
VEE	3,2°C	2min;25s	Variable 5-8°C	4,5°C	3min;22s	Variable 5-8°C

	Arranque					
	Sin variador de velocidad			Con variador de velocidad		
	Overshoot	Tiempo	Ref.	Overshoot	Tiempo	Ref.
VET	4°C	2min;10s	5-8°C	9,2°C	3min;56s	5-8°C
VEE	31°C	5min;12s	Variable 5-8°C	23°C	4min;12s	Variable 5-8°C

Comparativamente el comportamiento de la VEE fue inferior al comportamiento de la VET dentro de los rangos de capacidad nominal del sistema, pero ante cargas altas el control de la VEE responde de manera eficiente.

- Al utilizar la resistencia térmica y un ventilador para mover el aire y aplicando una la estrategia de control PID a la regulación de ambos elementos, se presenta un consumo de potencia de aproximadamente 66,7 Vatios, el cual es baja comparada con el consumo total del sistema.

RECOMENDACIONES

- Para futuras propuestas de diseño se recomienda investigar sobre la válvula de control de flujo de refrigerante, donde la activación no sea térmica sobre el bulbo, al demostrarse a través del proyecto que esta última no es viable en los sistemas de refrigeración. Se propone en consecuencia investigar sobre la aplicabilidad de otro tipo de válvulas de control electrónico activadas ya sea por motor paso a paso o servomotor.
- Se recomienda continuar con estos temas de investigación, aunque no se den los resultados esperados se llega a un alto nivel de comprensión de los fenómenos que enmarcan este proceso, lo que permitió además, adquirir, aclarar y definir conceptos sobre dicha temática.

BIBLIOGRAFIA

CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinámica. Tomo II. Segunda Edición. Mc Graw Hill. Impreso D'Vinni Editorial Limitada. Colombia, 1997

COTTEL, L. W. Aire Acondicionado y Refrigeración. Editorial Limusa Noriega Editores. Primera Edición. México, 2000

CREUS, José Alarcón. Tratado Practico de Refrigeración Automática. Alfaomega-Marcombo 12ª Edición. España, 2000

PIERRE, Rapín. Instalaciones Frigoríficas. Alfaomega-Marcombo Boixareu Editores. Tres Tomos, 1993

PITA G., Edward. Acondicionamiento del Aire, Principios y Sistemas. Compañía Editorial Continental S.A.. México, 1994

RAPIN, Pierre; JACQUARD, Patrick. Formulario del Frío. España: Marcombo S.A. 2001.

ROY, J. Dossat. Principios de refrigeración. Cesca. Compañía Editorial Continental. S.A. México 1998

Internet: www.danfoss.com

ANEXO A. SELECCIÓN DE LA VALVULA DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICA DANFOSS



Technical data

Valve type	AKV 10	AKV 15	AKV 20
Tolerance of coil voltage	+10 / -15%	+10 / -15%	+10 / -15%
Enclosure to IEC 529	Max. IP 67	Max. IP 67	Max. IP 67
Working principle (Pulse-width modulation)	PWM	PWM	PWM
Recommend period of time	6 seconds	6 seconds	6 seconds
Capacity (R22)	1 to 16 kW	25 to 100 kW	100 to 630 kW
Regulation range (Capacity range)	10 - 100%	10 - 100%	10 - 100%
Connection	Flare or solder	Solder	Solder or weld
Evaporating temperature	- 60 to 60°C	- 50 to 60°C	- 40 to 60°C
Ambient temperature	- 50 to 50 °C	- 40 to 50 °C	- 40 to 50 °C
Leak of valve seat	< 0.02% of k_v -value	< 0.02% of k_v -value	< 0.02% of k_v -value
MOPD	18 bar	22 bar	18 bar
Filter, replaceable	100µm	Non	Non
Max. working pressure	PB = 42 bar solder 28 bar flare	PB = 28 bar	PB = 28 bar

Rated capacity and Ordering

AKV 10 and AKV 15

Valve type	Rated capacity in kW ¹⁾				k_v -value m ³ /h	Connections					
	R 22	R 134a	R 404A/R 507	R 407C		Flare		Solder ODF			
						Inlet x outlet in.	Code no.	Inlet x outlet in.	Code no.	Inlet x outlet mm	Code no.
AKV 10-1	1.0	0.9	0.8	1.1	0.010	3/8 x 1/2	068F1160	3/8 x 1/2	068F1161	10 x 12	068F1162
AKV 10-2	1.6	1.4	1.3	1.7	0.017	3/8 x 1/2	068F1163	3/8 x 1/2	068F1164	10 x 12	068F1165
AKV 10-3	2.6	2.1	2.0	2.5	0.025	3/8 x 1/2	068F1166	3/8 x 1/2	068F1167	10 x 12	068F1168
AKV 10-4	4.1	3.4	3.1	4.0	0.046	3/8 x 1/2	068F1169	3/8 x 1/2	068F1170	10 x 12	068F1171
AKV 10-5	6.4	5.3	4.9	6.4	0.064	3/8 x 1/2	068F1172	3/8 x 1/2	068F1173	10 x 12	068F1174
AKV 10-6	10.2	8.5	7.8	10.1	0.114	3/8 x 1/2	068F1175	3/8 x 1/2	068F1176	10 x 12	068F1177
AKV 10-7	16.3	13.5	12.5	17.0	0.209	1/2 x 5/8	068F1178	1/2 x 5/8	068F1179	12 x 16	068F1180
AKV 15-1	25.5	21.2	19.6	25.2	0.25			3/4 x 3/4	068F5000	18 x 18	068F5001
AKV 15-2	40.8	33.8	31.4	40.4	0.40			3/4 x 3/4	068F5005	18 x 18	068F5006
AKV 15-3	64.3	53.3	49.4	63.7	0.63			7/8 x 7/8	068F5010	22 x 22	068F5010
AKV 15-4	102	84.6	78.3	101	1.0			1 1/8 x 1 1/8	068F5015	28 x 28	068F5016