

**DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN EN CARGA PARCIAL BAJO ESQUEMAS DE CONTROL  
CONTINUO Y CONTROL ON-OFF**

**DANIEL EDUARDO BARAJAS MERCHÁN  
MARTHA LILIANA GÓMEZ SARMIENTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

**DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN EN CARGA PARCIAL BAJO ESQUEMAS DE CONTROL  
CONTINUO Y CONTROL ON-OFF**

**DANIEL EDUARDO BARAJAS MERCHÁN  
MARTHA LILIANA GÓMEZ SARMIENTO**

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

**Director  
OMAR A. GÉLVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

## **DEDICATORIA**

A mi padre, José Antonio por su sacrificio y perseverancia en la superación de su hijo.

A la memoria de mi madre, Rosalba por sus enseñanzas y fe en su hijo.

A mi hermano, José Luis por su comprensión y apoyo.

Y a todos aquellos que con sus conocimientos  
aportaron para que llegara a ser un gran  
Ingeniero Mecánico.

**Daniel Eduardo**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Juan Darío y Martha Lucía, por depositar su confianza en mí,  
apoyándome en la consecución de este sueño.

A mis hermanos, Juan Ricardo y Carlos Alberto, por su amor y  
compresión

A mi sobrino Santiago, por darme tantas alegrías.

A todos aquellos quienes de una u otra forma  
contribuyeron a mi formación profesional

**Martha Liliana**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander, por la oportunidad que nos brinda de entrar a través de sus sedes de Málaga y Socorro y la gran posibilidad de salir adelante.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, especialmente al personal docente, por su colaboración y aporte de conocimiento para desempeñarnos en esta gran profesión.

Al Ingeniero Omar Armando Gelvez Arocha, docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su confianza, colaboración, conocimiento, formación académica y apoyo en la realización de este proyecto de grado.

Al Ingeniero Gabriel Ordoñez Plata, docente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, por su aporte en el momento indicado.

Al Ingeniero José Amaya Palacios, Jefe división de mantenimiento Planta Física, por su colaboración y autorización de equipos para el arreglo del cuarto frío del laboratorio de refrigeración.

Al grupo de técnicos pertenecientes a la Escuela de Ingeniería Mecánica (Gonzalo Calderón Caballero, Freddy Vargas Quintero) y Planta Física (Pedro E. Caldas, Jesús A. Sánchez), por su colaboración para la puesta en marcha del cuarto frío.

A nuestras familias por su gran apoyo y comprensión en los momentos difíciles de nuestro transcurrir por la universidad.

A todos nuestros amigos y compañeros de la Universidad por su amistad...

**Los autores**

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN .....</b>	<b>3</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	3
1.2 CAPACIDAD DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	5
1.2.1 Definición.....	5
1.2.2 Variación de la capacidad de un sistema de refrigeración.....	6
1.3 ESTRATEGIAS DE CONTROL EN LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	11
1.3.1 Estrategias de control ON-OFF .....	11
1.3.2 Estrategia de control continuo.....	16
1.4 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA CONSUMIDA EN CADA ESTRATEGIA DE CONTROL.....	25
1.4.1 Con la estrategia de control ON-OFF:.....	28
1.4.2 Con la estrategia de control continuo:.....	28
1.5 PARALELO ENTRE EL CONTROL CONTINUO Y ON-OFF EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	28
<b>2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL CUARTO FRÍO DEL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN .....</b>	<b>31</b>
2.1 CAMARA DE ENFRIAMIENTO.....	32
2.2 APARATOS PRINCIPALES DEL CUARTO FRÍO.....	33
2.2.1 Motocompresor hermético de pistones .....	33
2.2.2 Condensador .....	35
2.2.3 Valvula de expansión termostática.....	36
2.2.4 Evaporador .....	37
2.3 APARATOS ANEXOS AL CIRCUITO .....	38
2.3.1 Separador de aceite.....	38
2.3.2 Recipiente de líquido .....	39
2.3.3 Filtro deshidratador de la línea de líquido.....	40
2.3.4 Visor de líquido .....	41

2.3.5 Intercambiador de calor .....	42
2.3.6 Recipiente de succión.....	43
2.3.7 Amortiguador de vibraciones .....	44
2.3.8 Válvulas solenoides .....	45
2.3.9 Válvulas de servicio .....	46
2.4 APARATOS PRINCIPALES DE AUTOMATISMO.....	47
2.4.1 Puesta en marcha.....	48
2.4.2 Aparatos de protección .....	51
2.4.3 Aparatos de control.....	52
2.5 ELEMENTOS USADOS PARA EL MONITOREO DE LAS VARIABLES DEL CUARTO FRÍO.....	59
2.5.1 Termocuplas.....	59
2.5.2 Sistema de adquisición de datos.....	61
2.5.3 Pinzas .....	66
<b>3 ESCENARIOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL CUARTO FRÍO.....</b>	<b>68</b>
3.1 TEMPERATURA DE REFERENCIA .....	68
3.2 DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS IMPUESTAS.....	69
3.2.1 Cálculo de cargas al 100% .....	72
3.2.2 Determinación de las cargas parciales a las temperaturas de vaporación de estudio .....	77
3.3 TENIENDO EN CUENTA LA PERTURBACIONES.....	79
3.4 TEMPERATURA AMBIENTE EXTERNA .....	79
<b>4 IMPLEMENTACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL DEL CUARTO FRÍO DEL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN .....</b>	<b>82</b>
4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ON-OFF .....	82
4.2 CONTROL CONTINUO .....	84
4.2.1 Control continuo con pid .....	85
4.2.2 Control continuo con logica fuzzy.....	91
<b>5 PRUEBAS.....</b>	<b>96</b>
5.1 PROGRAMA DE MONITOREO Y CONTROL .....	96
5.1.1 Presentación .....	97

5.1.2	Cuarto frío .....	99
5.1.3	Full carga .....	102
5.1.4	ON-OFF .....	105
5.1.5	PID.....	108
5.1.6	LOGICA FUZZY .....	110
5.2	TOMA DE DATOS .....	115
5.3	ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	127
5.3.1	Prueba 1: Control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones .....	127
5.3.2	Prueba 2: Control ON-OFF 60% a 0°C con perturbaciones .....	129
5.3.3	Prueba 3: Control ON-OFF 20% a 0°C sin perturbaciones .....	131
5.3.4	Prueba 4: Control ON-OFF 20% a 0°C con perturbaciones .....	133
5.3.5	Prueba 5: Control ON-OFF 60% a -5°C sin perturbaciones .....	135
5.3.6	Prueba 6: Control ON-OFF 60% a -5°C con perturbaciones .....	137
5.3.7	Prueba 7: Control ON-OFF 20% a -5°C sin perturbaciones .....	139
5.3.8	Prueba 8: Control ON-OFF 20% a -5°C con perturbaciones .....	141
5.3.9	Prueba 9: Control PID 60% a 0°C sin perturbaciones .....	144
5.3.10	Prueba 10: Control PID 60% a 0°C con perturbaciones .....	146
5.3.11	Prueba 11: Control PID 20% a 0°C sin perturbaciones .....	148
5.3.12	Prueba 12: Control PID 20% a 0°C con perturbaciones .....	150
5.3.13	Prueba 13: Control PID 60% a -5°C sin perturbaciones .....	152
5.3.14	Prueba 14: Control PID 60% a -5°C con perturbaciones .....	154
5.3.15	Prueba 15: Control PID 20% a -5°C sin perturbaciones .....	156
5.3.16	Prueba 16: Control PID 20% a -5°C con perturbaciones.....	158
5.3.17	Prueba 17: Control FUZZY 60% a 0°C sin perturbaciones.....	161
5.3.18	Prueba 18: Control FUZZY 60% a 0°C con perturbaciones.....	163
5.3.19	Prueba 19: Control FUZZY 20% a 0°C sin perturbaciones.....	165
5.3.20	Prueba 20: Control FUZZY 20% a 0°C con perturbaciones.....	167
<b>6</b>	<b>DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL IMPLEMENTADAS EN EL CUARTO FRÍO .....</b>	<b>169</b>
6.1	DETERMINACION DE CONSUMO DE ENERGIA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF .....	169

6.2 DETERMINACIÓN DE CONSUMO DE ENERGIA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO .....	175
6.2.1 PID .....	175
6.2.2 LOGICA FUZZY.....	181
6.3 COMPARACION DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL IMPLEMENTADAS.....	185
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>193</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>197</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>198</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>200</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes del ciclo de refrigeración por compresión de vapor .....	3
Figura 2: Ciclo termodinámico P-H de un sistema de refrigeración por compresión de vapor .....	4
Figura 3: Formas de variar la capacidad de un sistema de refrigeración .....	6
Figura 4: Balance de presiones en la válvula termostática de expansión .....	7
Figura 5: Aumento de la capacidad con la $T_{ev}$ .....	8
Figura 6: Aumento de la capacidad con la variación de las RPM del compresor.....	9
Figura 7: Control de dos posiciones ON-OFF .....	11
Figura 8: Tipos de termostatos .....	12
Figura 9: Representación del control accionado por temperatura .....	13
Figura 10: Presostato .....	14
Figura 11: Representación del control accionado por presostato.....	15
Figura 12: Modelo general del sistema de control continuo.....	16
Figura 13: Cuadro sinóptico del modelo general de la estrategia de control continuo.....	18
Figura 14: Diagrama de bloque de un control PID.....	21
Figura 15: Diagrama de bloque de un control con lógica fuzzy.....	22
Figura 16: Estrategia de control continuo basado en PC .....	23
Figura 17: Circuito de control del cuarto frío.....	26
Figura 18: Triangulo de potencias .....	27
Figura 19: Cuadro sinóptico de los componentes del cuarto frío .....	31
Figura 20: Cámara de enfriamiento del cuarto de refrigeración del laboratorio de refrigeración .....	32
Figura 21: Compresor hermético Copeland.....	33
Figura 22: Condensador del cuarto frío de refrigeración .....	35

Figura 23: Válvulas de expansión termostáticas del cuarto frío .....	36
Figura 24: Evaporador del cuarto frío .....	37
Figura 25: Separador de aceite del cuarto frío .....	39
Figura 26: Recipiente de líquido del cuarto frío.....	40
Figura 27: Filtro deshidratador del cuarto frío.....	41
Figura 28: Visor de líquido del cuarto frío .....	41
Figura 29: Intercambiador de calor del cuarto frío .....	43
Figura 30: Recipiente de succión del cuarto frío .....	44
Figura 31: Amortiguador de vibraciones del cuarto frío .....	45
Figura 32: Válvulas solenoides del cuarto frío.....	46
Figura 33: Válvulas de servicio del cuarto frío.....	47
Figura 34: Amperímetro digital del cuarto frío .....	54
Figura 35: Voltímetro análogo del cuarto frío .....	55
Figura 36: Variador de velocidad del cuarto frío .....	56
Figura 37: Autotransformador variable del cuarto frío.....	57
Figura 38: Cuadro sinóptico de los elementos de monitoreo del cuarto frío .....	59
Figura 39: Termocuplas tipo T y J .....	60
Figura 40: Fuente regulada del cuarto frío .....	61
Figura 41: Modulo FP-1000 .....	62
Figura 42: Modulo FP-TC-120.....	63
Figura 43: Modulo FP-AO-210 .....	64
Figura 44: Modulo FP-DO-400.....	65
Figura 45: Pinzas para medición de variables eléctricas.....	67
Figura 46: Escenarios de investigación para la determinación del consumo energético del cuarto frío .....	68
Figura 47: Componentes de la carga impuesta .....	69
Figura 48: Determinación de la carga nominal del cuarto frío a 0 °C .....	71
Figura 49: Determinación de la carga nominal del cuarto frío a 0 °C .....	72

Figura 50: Panel frontal del programa de monitoreo de la temperatura ambiente en LabVIEW .....	80
Figura 51: Diagrama de bloques del programa de monitoreo de la temperatura ambiente en LabVIEW .....	81
Figura 52: Funcionamiento del algoritmo de control ON-OFF .....	83
Figura 53: Implementación del control ON-OFF en el cuarto frío .....	83
Figura 54: Implementación del control continuo en el cuarto frío.....	85
Figura 55: Acciones independientes y combinadas que intervienen en un controlador PID.....	86
Figura 56: Curva de respuesta en forma de S .....	87
Figura 57: Curva y parámetros de sintonización del cuarto frío .....	88
Figura 58: Curva de respuesta de escalón unitario .....	89
Figura 59: Sintonización final del control PID .....	90
Figura 60: Etapas de un sistema fuzzy.....	94
Figura 61: Pestañas del programa de monitoreo y control.....	96
Figura 62: Panel Frontal de la pestaña Presentación .....	97
Figura 63: Diagrama de Bloque de la pestaña Presentación.....	98
Figura 64: Panel Frontal de la pestaña Cuarto Frío .....	100
Figura 65: Diagrama de Bloque de la pestaña Cuarto frío .....	101
Figura 66: Panel Frontal de la pestaña Full Carga .....	103
Figura 67: Diagrama de Bloque de la pestaña Full Carga .....	104
Figura 68: Panel Frontal de la pestaña de control ON-OFF.....	106
Figura 69: Diagrama de Bloque de la pestaña ON-OFF.....	107
Figura 70: Panel Frontal de la pestaña PID .....	108
Figura 71: Diagrama de Bloque de la pestaña PID .....	110
Figura 72: Panel Frontal de la pestaña Lógica Fuzzy .....	111
Figura 73: Diagrama de Bloque de la pestaña Lógica Fuzzy .....	112
Figura 74: Fuzzy Set Editor del control FUZZY .....	114

Figura 75: Rulebase-Editor del control FUZZY .....	115
Figura 76: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones .....	127
Figura 77: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones .....	128
Figura 78: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 60% a 0°C con perturbaciones.....	129
Figura 79: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 60% a 0°C con perturbaciones .....	130
Figura 80: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 20% a 0°C sin perturbaciones .....	131
Figura 81: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 20% a 0°C sin perturbaciones .....	132
Figura 82: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 20% a 0°C con perturbaciones.....	133
Figura 83: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 20% a 0°C con perturbaciones .....	134
Figura 84: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 60% a -5°C sin perturbaciones .....	135
Figura 85: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 60% a -5°C sin perturbaciones .....	136
Figura 86: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 60% a -5°C con perturbaciones.....	137
Figura 87: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 60% a -5°C con perturbaciones .....	138
Figura 88: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 20% a -5°C sin perturbaciones .....	139
Figura 89: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 20% a -5°C sin perturbaciones .....	140

Figura 90: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 20% a -5°C con perturbaciones.....	141
Figura 91: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 20% a -5°C con perturbaciones .....	142
Figura 92: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 60% a 0°C sin perturbaciones .....	144
Figura 93: Potencia Vs tiempo en el control PID 60% a 0°C sin perturbaciones.	145
Figura 94: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 60% a 0°C con perturbaciones .....	146
Figura 95: Potencia Vs tiempo en el control PID 60% a 0°C con perturbaciones	147
Figura 96: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 20% a 0°C sin perturbaciones .....	148
Figura 97: Potencia Vs tiempo en el control PID 20% a 0°C sin perturbaciones.	149
Figura 98: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 20% a 0°C con perturbaciones .....	150
Figura 99: Potencia Vs tiempo en el control PID 20% a 0°C con perturbaciones	151
Figura 100: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 60% a -5°C sin perturbaciones .....	152
Figura 101: Potencia Vs tiempo en el control PID 60% a -5°C sin perturbaciones .....	153
Figura 102: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 60% a -5°C con perturbaciones.....	154
Figura 103: Potencia Vs tiempo en el control PID 60% a -5°C con perturbaciones .....	155
Figura 104: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 20% a -5°C sin perturbaciones .....	156
FIGURA 105: Potencia Vs tiempo en el control PID 20% a -5°C sin perturbaciones .....	157

Figura 106: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 20% a -5°C con perturbaciones.....	158
Figura 107: Potencia Vs tiempo en el control PID 20% a -5°C con perturbaciones .....	159
Figura 108: Comportamiento de las temperaturas en el control FUZZY 60% a 0°C sin perturbaciones .....	161
Figura 109: Potencia Vs tiempo en el control FUZZY 60% a 0°C sin perturbaciones .....	162
Figura 110: Comportamiento de las temperaturas en el control FUZZY 60% a 0°C con perturbaciones.....	163
Figura 111: Potencia Vs tiempo en el control FUZZY 60% a 0°C con perturbaciones .....	164
Figura 112: Comportamiento de las temperaturas en el control FUZZY 20% a 0°C sin perturbaciones .....	165
Figura 113: Potencia Vs tiempo en el control FUZZY 20% a 0°C sin perturbaciones .....	166
Figura 114: Comportamiento de las temperaturas en el control FUZZY 20% a 0°C con perturbaciones.....	167
Figura 115: Potencia Vs tiempo en el control FUZZY 20% a 0°C con perturbaciones .....	168
Figura 116: Consumo de energía de los diferentes escenarios en estudio con control ON-OFF .....	172
Figura 117: Comparación de los consumos energéticos de los escenarios en estudio con control ON-OFF.....	174
Figura 118: Consumo de potencia del cuarto frío con control PID a 60% a -5°C con perturbaciones.....	175
Figura 119: Consumo de energía en los escenarios de estudio con control PID.	178
Figura 120: Comparación de los consumos energéticos de los escenarios en estudio con control PID .....	180

Figura 121: Consumo de energía en los escenarios de estudio con control PID.	183
Figura 122: Comparación de los consumos energéticos de los escenarios en estudio con control FUZZY .....	184
Figura 123: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 60% a 0°C sin perturbaciones.....	186
Figura 124: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 60% a 0°C con perturbaciones.....	187
Figura 125: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 20% a 0°C sin perturbaciones.....	188
Figura 126: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 20% a 0°C con perturbaciones.....	188
Figura 127: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 60% a -5°C sin perturbaciones .....	189
Figura 128: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 60% a -5°C con perturbaciones .....	189
Figura 129: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 20% a -5°C sin perturbaciones .....	190
Figura 130: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 20% a -5°C con perturbaciones.....	190
Figura 131: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío.....	191

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de termocuplas.....	19
Tabla 2: Mecanismos de adquisición de datos .....	24
Tabla 3: Paralelo entre la estrategia ON-OFF y la estrategia de control continuo .	29
Tabla 4: Diagramas de bloque de las estrategias de control .....	30
Tabla 5: Nomenclatura del compresor hermético Copeland .....	34
Tabla 6: Determinación del contenido de humedad de los refrigerantes HFC y HCFC.....	42
Tabla 7: Ubicación de los interruptores de botón en la caja de control del cuarto frío.....	49
Tabla 8: Automatismos de puesta en marcha del cuarto frío.....	50
Tabla 9: Automatismos de protección del cuarto frío .....	52
Tabla 10: Ubicación de los visores luminosos de la caja de control del cuarto frío	53
Tabla 11: Automatismos de Control del cuarto frío .....	58
Tabla 12: Tipo de termocuplas del cuarto frío.....	60
Tabla 13: Uso de las temperaturas de vaporación escogidas .....	69
Tabla 14: Cálculo de la carga por paredes en el cuarto frío .....	73
Tabla 15: Calculo de la carga debido a la apertura de puertas.....	75
Tabla 16: Calculo de la carga debido a las resistencias .....	77
Tabla 17: Carga total a la capacidad nominal de las temperaturas de vaporación en estudio .....	78
Tabla 18: Cargas parciales al 20% .....	78
Tabla 19: Cargas parciales al 60% .....	79
Tabla 20: Escenarios de investigación para la determinación del consumo energético .....	81
Tabla 21: Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.....	87
Tabla 22: Valores finales de las constantes del control PID del cuarto frío .....	89

Tabla 23: Funciones de pertenencia de la lógica fuzzy .....	92
Tabla 24: Diseño del control Fuzzy del cuarto frío .....	95
Tabla 25: Datos térmicos de la prueba realizada con control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones.....	117
Tabla 26: Datos eléctricos de la prueba realizada con control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones.....	122
Tabla 27: Resultados del control ON-OFF en los diferentes escenarios de estudio durante las 2 horas de prueba .....	143
Tabla 28: Intervalos de potencia consumida en el control PID en los diferentes escenarios de estudio durante las 2 horas de prueba .....	160
Tabla 29: Consumo energético de los escenarios en estudio con control ON-OFF .....	173
Tabla 30: Formato de cálculo para determinar el consumo de energía en el control PID.....	176
Tabla 31: Consumo energético de los escenarios en estudio con control PID ....	179
Tabla 32: Formato de cálculo para determinar el consumo de energía en el control FUZZY .....	181
Tabla 33: Consumo energético de los escenarios en estudio con control FUZZY .....	182
Tabla 34: Comparación de los consumos energéticos de los escenarios en estudio con control continuo y control ON-OFF.....	186
Tabla 35: Porcentajes de ahorro de energía entre los diferentes controles implementados para el estudio energético del cuarto frío.....	192

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS DE LOS COMPONENTES DEL CUARTO FRÍO DEL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN .....	201
ANEXO B: TABLAS DEL COMPRESOR COPELAN CS12K6E-TF5 .....	214
ANEXO C: PARTES, DESCRIPCIÓN, CONEXIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD .....	218
ANEXO D: GUIA DE FUNCIONAMIENTO DEL HARDWARE Y SOFTWARE DE MONITOREO Y CONTROL .....	232
ANEXO E: GUIA DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO .....	242
ANEXO F: PLANOS: ELECTRICO, DE POTENCIA, DE CONTROL, ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL CUARTO FRÍO Y MODULOS FIELD POINT .....	259

## GLOSARIO

**Capacidad de refrigeración.** Flujo de calor realmente retirado por el refrigerante que circula por el evaporador.

**Carga de refrigeración.** Flujo de calor impuesto por el sistema a enfriar sobre el evaporador del sistema de refrigeración.

**Carga parcial.** Es aquella carga que es más baja que la carga para la cual fue creada el cuarto (carga nominal, los sistemas de refrigeración se diseñan para esta carga máxima).

**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.

**Control.** Regulación del equipo para mantener una condición deseada.

**Estado estable.** En este estado la capacidad es igual a la carga.

**Efecto refrigerante.** Energía por unidad de masa efectivamente retirada por el refrigerante.

**Estado transitorio.** En este estado la capacidad es diferente a la carga.

**Field point.** Módulos utilizados para la adquisición y control de datos.

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

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

**LabVIEW.** Entorno gráfico de programación para la automatización de procesos industriales.

**Refrigerante.** Fluido que se utiliza para producir un efecto de enfriamiento, absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia.

**Tonelada de refrigeración.** Unidad que mide la cantidad de flujo de calor. Se utiliza en refrigeración y equivale a 12000 Btu/h.

## RESUMEN

### TÍTULO:

**DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN CARGA PARCIAL BAJO ESQUEMAS DE CONTROL CONTINUO Y CONTROL ON-OFF\***

### AUTORES:

**Daniel Eduardo Barajas Merchán  
Martha Liliana Gómez Sarmiento\*\***

### PALABRAS CLAVES:

Consumo Energético, Refrigeración, Carga Parcial, Control Continuo, Control ON-OFF.

### DESCRIPCIÓN:

La capacidad de los sistemas de refrigeración varía a medida que la temperatura de vaporización cambia es por esta razón que estos sistemas utilizan ya sea un control continuo (variando la velocidad del compresor) o un control ON-OFF (encendiendo y apagando el compresor) para adecuar la capacidad a las condiciones de demanda.

El control continuo representa un porcentaje de ahorro energético respecto al control ON-OFF lo cual se comprobó con un estudio preliminar realizado en el cuarto frío del laboratorio de refrigeración de la Escuela de Ingeniería Mecánica, pero arrojo porcentajes de ahorro muy grandes que no cumplen con las expectativas y se salen de la realidad, por lo que se cree que se cometieron errores en las mediciones. Lo que se busco con este proyecto fue determinar el consumo energético de un sistema de refrigeración realizando para ello un nuevo análisis energético con control ON-OFF y continuo, pero además de usar un PID en el control continuo se implemento un algoritmo de control lógico difusivo (Fuzzy) que permitió obtener unos nuevos datos energéticos para la comparación con los otros controles y con el estudio preliminar realizado en el cuarto frío. Todo lo anterior se implemento en el software de control LabVIEW el cual permite una gran facilidad de adquisición y control mediante su hardware Field point.

Como resultado de la investigación se comprobó que efectivamente el control continuo tiene un mayor ahorro energético que el control ON-OFF y se obtuvieron porcentajes de ahorro que concuerdan con la realidad, además dentro del control continuo se obtuvo que el control Fuzzy brinda aun más un ahorro energético que el control PID debido a que este control presenta menor oscilación que el PID.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Omar Armando Gelvez Arocha

## SUMMARY

**TITLE:**

**TO DETERMINE THE ENERGY CONSUMPTION OF A COOLING SYSTEM IN PARCIAL LOAD UNDER CONTINUOUS CONTROL AND ON-OFF CONTROL DIAGRAMS<sup>♦</sup>**

**AUTHORS:**

**Daniel Eduardo Barajas Merchán  
Martha Liliana Gómez Sarmiento<sup>♦♦</sup>**

**KEY WORDS:**

Energy Consumption, Cooling, Parcial Load, Continuous Control, ON-OFF Control

**DESCRIPTION:**

The capacity of cooling systems varies as the vaporization temperature changes that is why that these systems use either a continuous control (Changing the speed of the compressor) or an ON-OFF control (Turning the compressor on and off) to adapt the capacity to the demand conditions.

Continuous control represents a percentage of energy saving with regard to ON-OFF control which was proved with a previous study made in the cold room from cooling laboratory at School of Mechanic Engineering, it showed high saving percentages that do not fulfill the expectations and that are unreal, thus it is thought there were some mistakes in the measurements. This project seeked for determining the energy consumption of a cooling system making a new energy analysis with ON-OFF control and continuous control, also a PID was used in the continuous control and a diffusive logic (Fuzzy) control algorithm was implemented to get new energy data to compare with other controls and with the previous study made in the cold room. All of this was implemented in the LabVIEW control software which allows great purchase and control easiness by means of its Field point hardware.

As a result of this investigation, it was proved that continuous control has higher energy saving than ON-OFF control and the saving percentages bring into agreement with reality, moreover we realized that with continuous control fuzzy control gives more energy saving than PID control because it shows less fluctuation than the PID one.

---

<sup>♦</sup> Graduation Project

<sup>♦♦</sup> Faculty of Physics-Mechanic Engineerings, School of Mechanic Engineering, Director Omar Armando Gelvez Arocha

## INTRODUCCION

Debido a los problemas de calentamiento global que se están presentando en el mundo se hace necesario un reacondicionamiento y un mejor control de todos los sistemas, sin estar exentos los sistemas de refrigeración.

Una de las maneras de controlar este problema en los sistemas de refrigeración es optimizando el control de la capacidad. Años atrás se utilizaba solo el control tipo ON-OFF que presenta pérdidas durante los periodos de arranque-parada, debidas a la demora del refrigerante en alcanzar el régimen permanente lo que da una disminución en la eficiencia del sistema; hoy en día gracias a las nuevas tecnologías se han incorporado sistemas de control continuo los cuales permiten una disminución de la potencia requerida para mover el compresor usando variadores de velocidad.

Con todo lo anteriormente mencionado se puede comprobar que efectivamente el sistema de control continuo ofrece porcentajes de ahorro de energía mayores que el sistema de control ON-OFF lo cual se corroboró con un estudio realizado en un proyecto de grado anterior en el cuarto frío del laboratorio de refrigeración de la Escuela de Ingeniería Mecánica. En este estudio se obtuvieron valores excesivos de ahorro de energía lo que no concuerda con estudios previos realizados en este campo, por esta razón se busco realizar unas nuevas mediciones con otras condiciones que permitieran corregir los posibles errores que se cometieron; para esto además del control ON-OFF y continuo con PID, también se implemento un nuevo algoritmo de control continuo por medio de lógica fuzzy.

Todo lo relacionado con el nuevo estudio energético se mostrara en este libro el cual cuenta con los siguientes capítulos:

Capitulo 1, en este capítulo se describen las generalidades de los sistemas de refrigeración.

Capitulo 2, en este capítulo se hace una clasificación y descripción a fondo de cada uno de los componentes del cuarto frío del laboratorio de refrigeración de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Capitulo 3, en este capítulo se muestra y describe cada uno de los escenarios de investigación implementados para la determinación del consumo energético del cuarto frío.

Capitulo 4, en este capítulo se describe cada una de las estrategias de control implementadas en el cuarto frío.

Capitulo 5, en este capítulo se hace una descripción del programa de monitoreo y control, además de un análisis de los datos obtenidos mediante la realización de las diferentes graficas que me permiten la modulación del comportamiento del sistema de refrigeración.

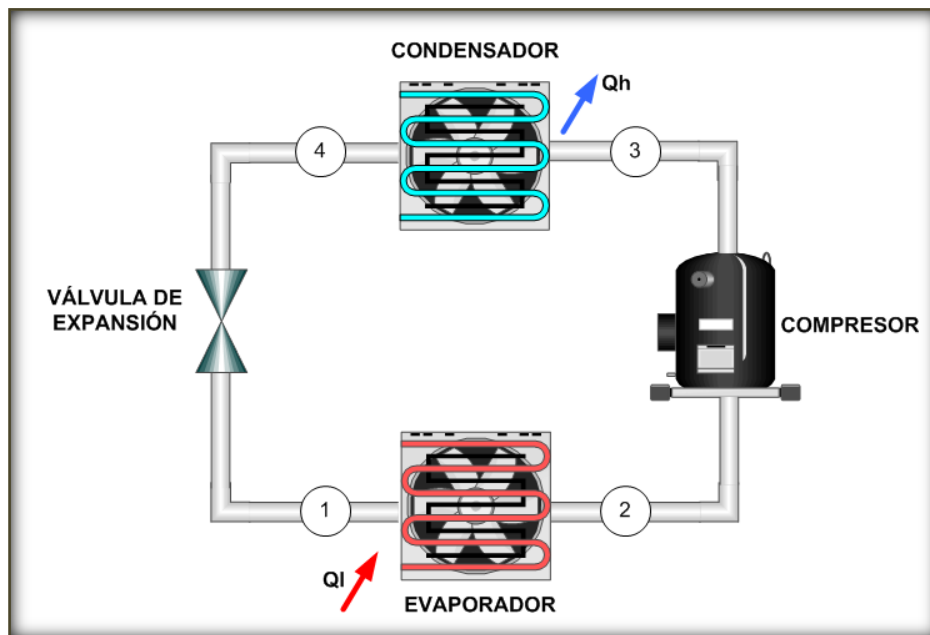
Capitulo 6, en este capítulo se hace una determinación, comparación y posterior análisis del resultado de consumo energético de cada una de las estrategias de control implementadas en el cuarto frío.

# 1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Los sistemas de refrigeración consisten en ciclos termodinámicos, mediante los cuales es posible tomar un flujo de calor de una fuente de baja temperatura para transmitir calor a un sumidero de mayor temperatura. El ciclo termodinámico se realiza utilizando una sustancia de trabajo que se denomina refrigerante, la cual cambia de estado durante el ciclo, permitiendo la transferencia de calor mencionada. El ciclo básico de un sistema de refrigeración por compresión de vapor consta principalmente de 4 elementos: evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión, como se puede apreciar en la figura 1.

**Figura 1: Componentes del ciclo de refrigeración por compresión de vapor**

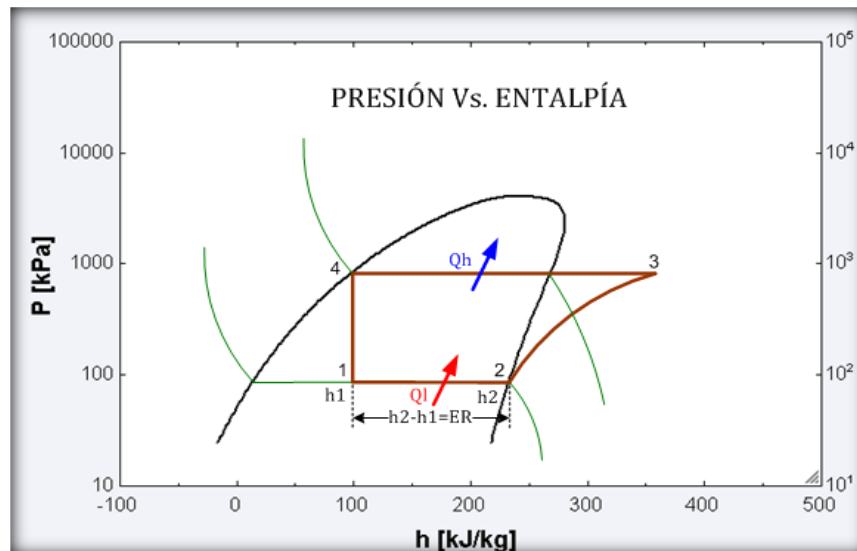


Fuente: Autores.

El ciclo termodinámico de funcionamiento de un sistema de compresión de vapor es el siguiente (Ver figura 2):

- Compresión (2-3): En el compresor, el refrigerante entra en forma de vapor saturado a baja presión y recibe un trabajo mecánico que eleva su presión, temperatura y entalpía hasta llevarlo a un estado de vapor sobrecalentado.
- Condensación (3-4): Luego, en el condensador, el refrigerante es enfriado pasando por vapor saturado a alta presión y posteriormente hasta condensarlo, entregando al ambiente energía en forma de calor ( $Q_h$ ).
- Expansión (4-1): Posteriormente este líquido a presión pasa por un dispositivo de estrangulación que lo expande súbitamente llevándolo al estado de vapor húmedo a baja presión, lo cual a su vez enfría el refrigerante preparándolo para ser la fuente de frío del proceso.
- Evaporación (1-2): Finalmente, en el evaporador el refrigerante extraerá calor del material refrigerado ( $Q_l$ ) para pasar de nuevo al estado de vapor saturado a baja presión, el cual pasa al compresor cerrando el ciclo.

**Figura 2: Ciclo termodinámico P-H de un sistema de refrigeración por compresión de vapor**



Fuente: Autores.

## 1.2 CAPACIDAD DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

**1.2.1 Definición.** La capacidad de un sistema de refrigeración corresponde a la cantidad de calor que el refrigerante es capaz de sacar del medio refrigerado y es igual al producto de la masa del refrigerante circulado por unidad de tiempo por la diferencia de entalpias del refrigerante entre la salida y entrada del evaporador.

$$CAP = \dot{m}_r \times ER = \rho_v \times \dot{V}_r \times ER$$
$$CAP = \rho_v \times \left( \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L \times RPM \times N \right) \times \varepsilon_T \times (h_2 - h_1) \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_T = 1 - f \times c \left( \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Donde:

$\dot{m}_r$ : Flujo másico de refrigerante.

ER: Efecto refrigerante, igual a  $h_2 - h_1$ .

$\rho_v$ : Densidad del vapor.

$\dot{V}_r$ : Caudal de refrigerante.

D: Diámetro del cilindro.

L: Carrera del cilindro.

RPM: Revoluciones por minuto del compresor.

N: Número de cilindros.

$\varepsilon_T$ : Eficiencia total.

$h_2 - h_1$ : Diferencia entalpias del refrigerante en el evaporador, equivalente a ER.

f: Factor de incremento, está entre 1.1 y 1.2.

c: Claro del pistón. (0.05 normalmente o menos).

$P_d$ : Presión de descarga del compresor.

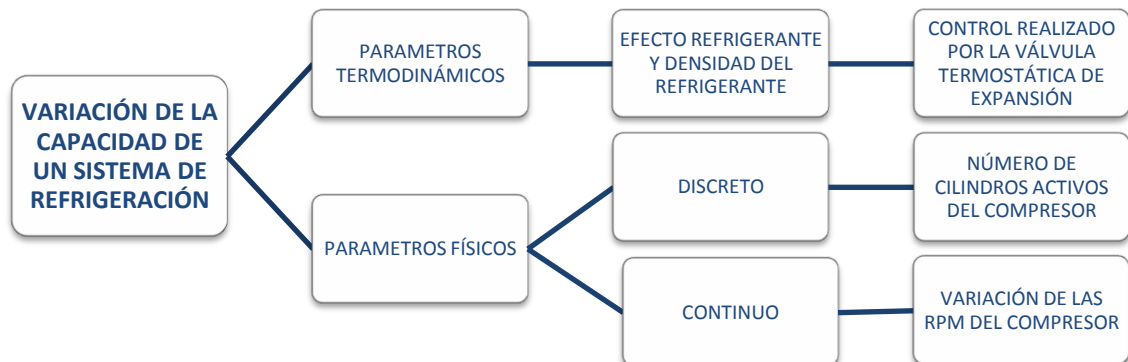
$P_s$ : Presión de succión del compresor.

n: Exponente politrópico de compresión.

### 1.2.2 Variación de la capacidad de un sistema de refrigeración.

De acuerdo a la ecuación (1.1) la capacidad de un sistema de refrigeración es afectada por dos tipos de parámetros: los termodinámicos (densidad y efecto refrigerante) y los físicos (geometría de los pistones del compresor), es por eso que la capacidad varía al cambiar alguno de ellos afectando directamente la temperatura de vaporación que este manejando el sistema. Las formas en las que se puede variar la capacidad de un sistema de refrigeración se muestran en la figura 3 y se explicarán a continuación.

**Figura 3: Formas de variar la capacidad de un sistema de refrigeración**



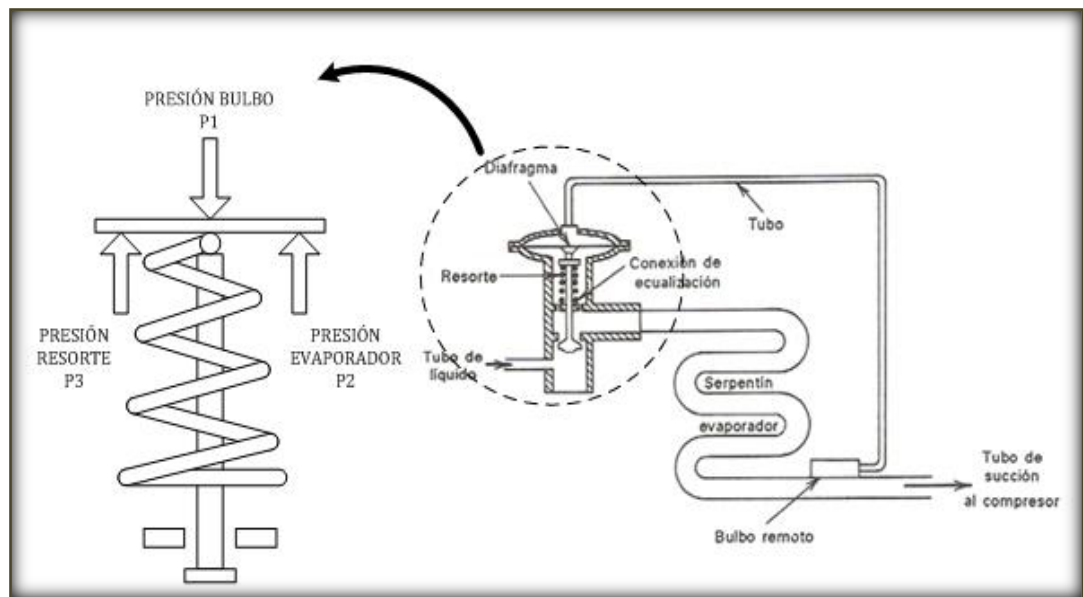
Fuente: Autores.

**1.2.2.1 Variación de la capacidad por medio de los parámetros termodinámicos.** Cuando varían los parámetros termodinámicos la válvula de expansión es la que se encarga de variar la capacidad de acuerdo a las condiciones de carga.

Esto lo hace mediante su bulbo remoto colocado a la salida del tubo de succión quien mide la temperatura del gas, este bulbo se encuentra conectado a la válvula por medio de un tubo de modo que la presión de fluido dentro del bulbo tienda a abrir más la válvula, contra la presión de cierre del resorte (Ver figura 4).

Si aumenta la carga del sistema, el refrigerante en el evaporador gana más calor y la temperatura del gas en la succión aumenta. La presión del fluido en el bulbo aumenta a medida que aumenta su temperatura y abre más la válvula. Con ello se aumenta el flujo de refrigerante que se necesita para manejar una carga mayor.

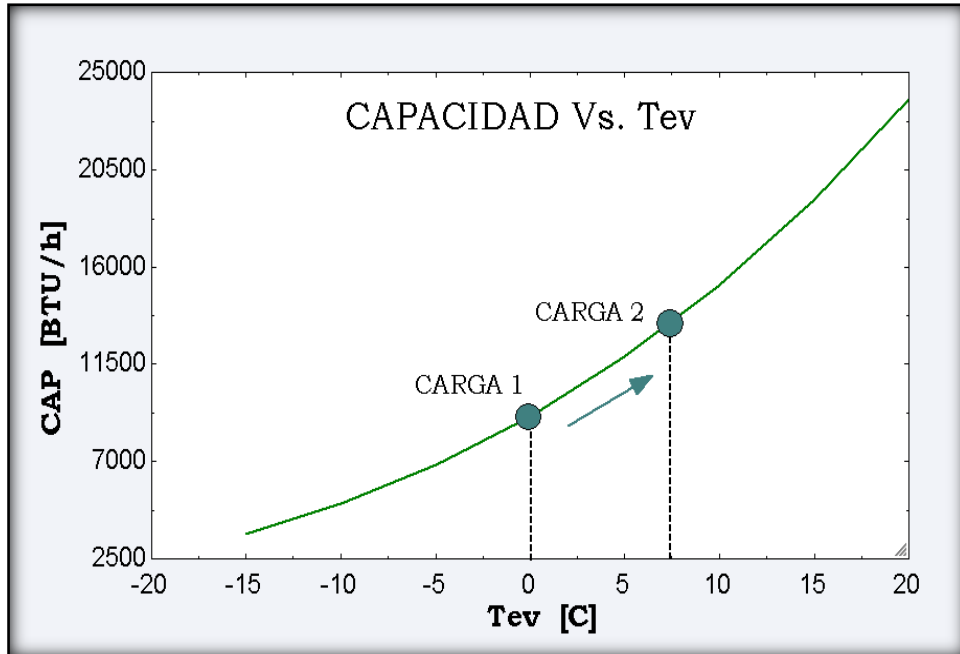
**Figura 4: Balance de presiones en la válvula termostática de expansión**



Fuente: Autores.

Esta válvula no controla en un punto fijo la temperatura de vaporación, esto hace que el efecto refrigerante y la densidad del vapor cambien produciéndose al mismo tiempo un cambio en la capacidad para que el sistema se pueda adaptar y pasar de una carga 1 a una carga 2, como se muestra en la figura 5.

**Figura 5: Aumento de la capacidad con la  $T_{ev}$**

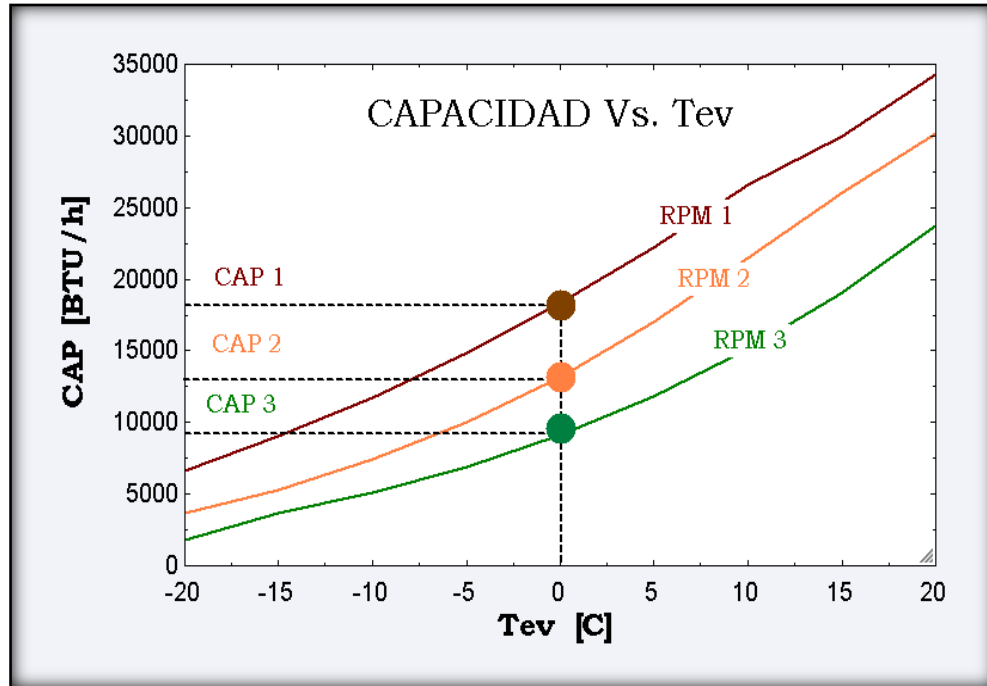


Fuente: Autores.

**1.2.2.2 Variación de la capacidad por medio de los parámetros físicos del compresor.** Por medio de este método se puede adaptar la capacidad a la carga pero a diferencia del anterior método este si mantiene la temperatura de vaporación constante.

Al mantener la temperatura de vaporación en un valor fijo los parámetros termodinámicos de la ecuación (1.1) permanecen constantes, entonces se debe recurrir al cambio de los parámetros físicos del compresor, ya sea variando el número de cilindros activos en el caso de un compresor con varios cilindros o aumentando o disminuyendo las RPM (Ver figura 6) de funcionamiento del mismo dependiendo de la carga que actué sobre el sistema.

Figura 6: Aumento de la capacidad con la variación de las RPM del compresor



Fuente: Autores.

- ✓ **Número de cilindros activos.** El control de la capacidad de un compresor de varios cilindros se logra descargando uno o más de ellos, haciéndolos inefectivos. Existen tres mecanismos principales mediante los cuales se pueden descargar estos cilindros.

El primer mecanismo desvía la descarga de uno o más de los cilindros, regresándola a la tubería de aspiración. Cuando la presión en la aspiración baja hasta un valor determinado, una válvula solenoide instalada en la tubería de desviación (bypass), impulsada por un presostato, abre y permite la descarga de uno o más cilindros, comunicando la descarga con la aspiración. Cuando la presión en la aspiración aumenta hasta un valor fijado, se desactiva el solenoide y se cierra el tubo de desviación, de forma que el compresor retorna a su capacidad de completo funcionamiento.

El segundo mecanismo para descargar los cilindros del compresor es abriendo las válvulas de aspiración del cilindro o los cilindros, de manera que éstas permanezcan abiertas durante la carrera de compresión. El vapor es devuelto a la tubería de aspiración. Cuando baja la presión en la aspiración hasta la presión de conectar el control de la presión, éste comanda una electroválvula que deja volver vapor a la presión de descarga al pistón que se quiere descargar. Este vapor actúa abriendo la válvula de admisión.

El tercer mecanismo consiste en colocar varios compresores en paralelo y desactivando uno de ellos o más cuando la presión de succión baja y conectándolos cuando la presión se vuelve a elevar.

- ✓ **Variación de las RPM del compresor.** El cambio de las RPM del compresor se puede hacer por medio de:
- ✓ **Variación del número de polos:** cambiando el número de par de polos en la ecuación (1.3) se puede aumentar o disminuir las revoluciones del compresor y así ajustar la capacidad del sistema a la carga impuesta.

$$RPM = \frac{60 \times f}{N_{polos}} \quad (1.3)$$

Donde:

f: frecuencia (Hz).

$N_{polos}$ : Número de par de polos activos.

- ✓ **Variación de la frecuencia:** Otra manera de variar las RPM del compresor es variando la frecuencia de las líneas de alimentación del motor del compresor por medio de un variador de velocidad, también llamado variador de frecuencia.

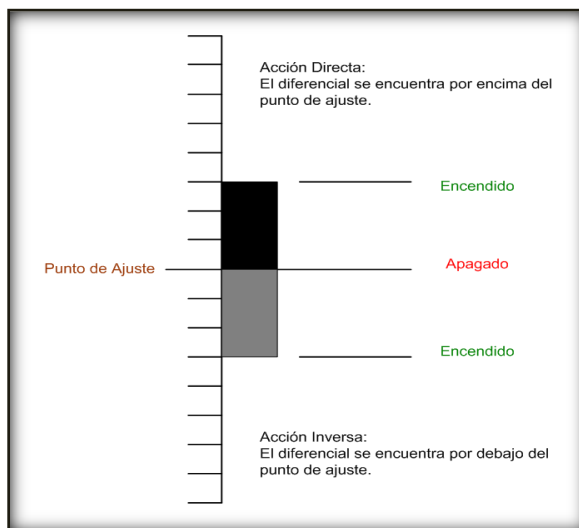
### 1.3 ESTRATEGIAS DE CONTROL EN LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

**1.3.1 Estrategias de control ON-OFF.** El control ON-OFF permite desconectar y conectar el sistema, de manera que haga la capacidad igual a cero apagando el compresor o igual a un valor de acuerdo con la temperatura de vaporación a la que se encuentre el sistema, generando ciclos de operación y descanso, de acuerdo con la temperatura deseada y el nivel de carga sobre el sistema. Esta estrategia se puede implementar de dos maneras:

- Controles de acción por temperatura (Termostatos)
- Controles de acción por presión (Presostatos)

En la figura 7 se puede observar el funcionamiento de un control de dos posiciones ON-OFF.

**Figura 7: Control de dos posiciones ON-OFF**



Fuente: Vancontrols<sup>1</sup>, vanguardia en controles.

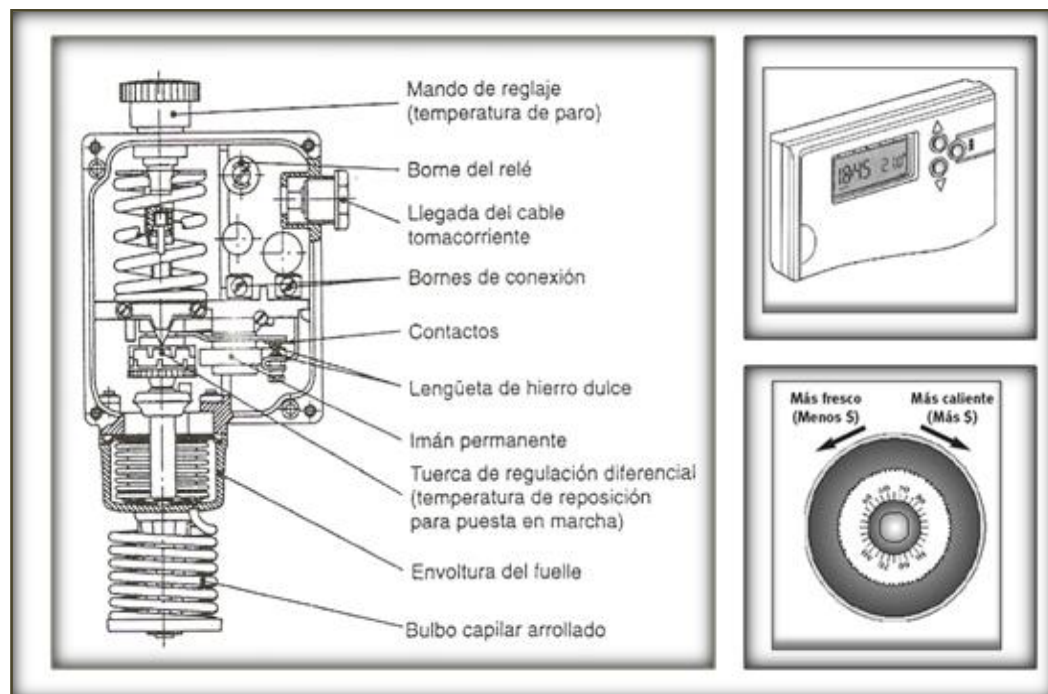
<sup>1</sup> Empresa Mexicana cuya actividad es la representación y asesoría de las más prestigias marcas en control para aire acondicionado y refrigeración.

**1.3.1.1 Controles de acción por temperatura.** Un termostato es básicamente un termómetro adjunto a un interruptor. El trabajo de los termostatos es regular la temperatura de una superficie fría o de un ambiente frío entre dos límites prefijados, lo más cercana posible a la temperatura real que se desea obtener, abriendo o cerrando un circuito eléctrico bajo la acción de una variación de temperatura (Ver figura 8).

El termostato incluye necesariamente:

- ✓ Un órgano de detección: termómetro.
- ✓ Un órgano de mando: interruptor eléctrico.
- ✓ Un dispositivo de enlace mecánico: se encarga de unir el termómetro con el interruptor eléctrico.

**Figura 8: Tipos de termostatos**

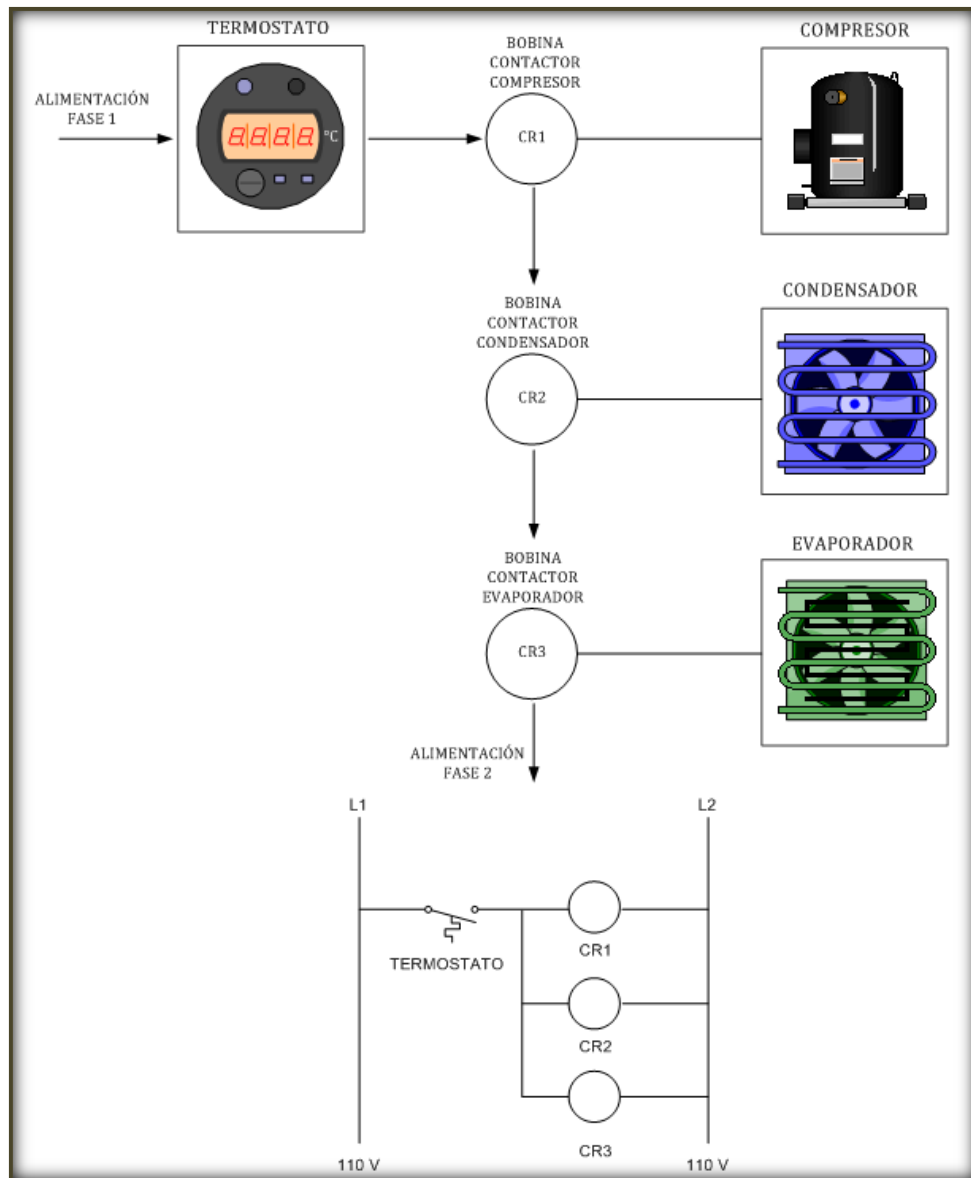


Fuente: Madison Gas and Electric' (MGE)<sup>2</sup>, pdf aprenda sobre termostatos.

<sup>2</sup> Empresa E.U.A que genera y distribuye electricidad y gas.

La regulación se establece por la diferencia entre las temperaturas de conexión y desconexión del termostato, cuya sensibilidad se traduce por la diferencia mínima que se puede obtener, prácticamente esta diferencia es de 2°C.

**Figura 9: Representación del control accionado por temperatura**

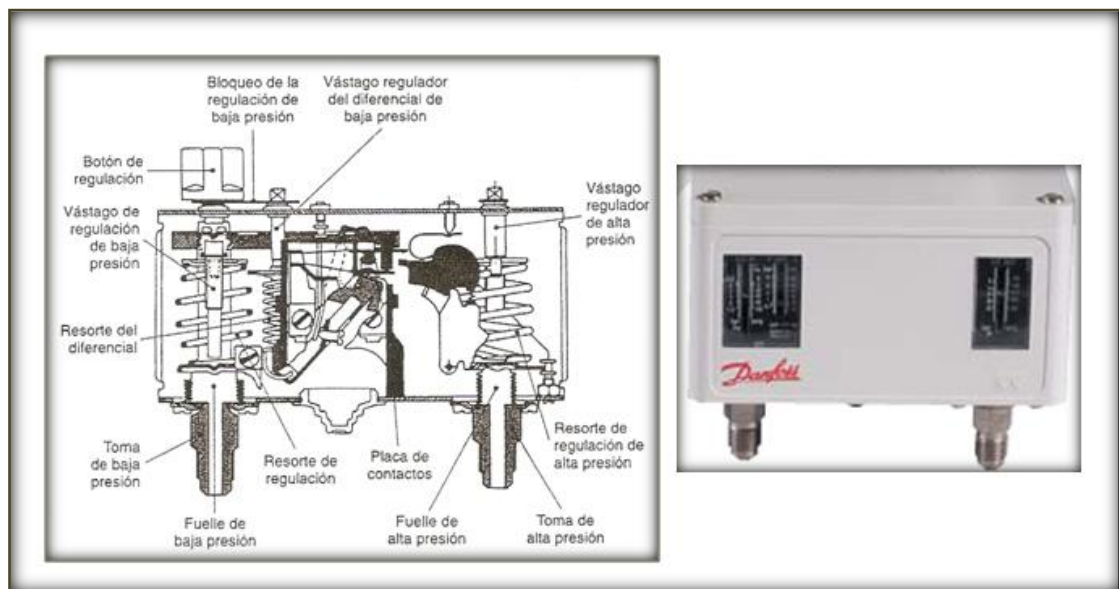


Fuente: Autores.

Cuando la temperatura del ambiente refrigerado es mayor que la temperatura de referencia mas la diferencia de temperaturas el termostato mantiene los contactos cerrados y el compresor energizado, cuando esta temperatura se hace menor el termostato abre los contactos y espera hasta que la temperatura sea mayor a la suma de la temperatura de referencia más la diferencia para restablecer la conexión, ver figura 9.

**1.3.1.2 Controles de acción de presión.** Un presostato se usa para detectar un nivel de presión. Dispone de dos contactos que se abren al subir la presión del punto al que esta ajustado, se puede observar en la figura 10.

**Figura 10: Presostato**



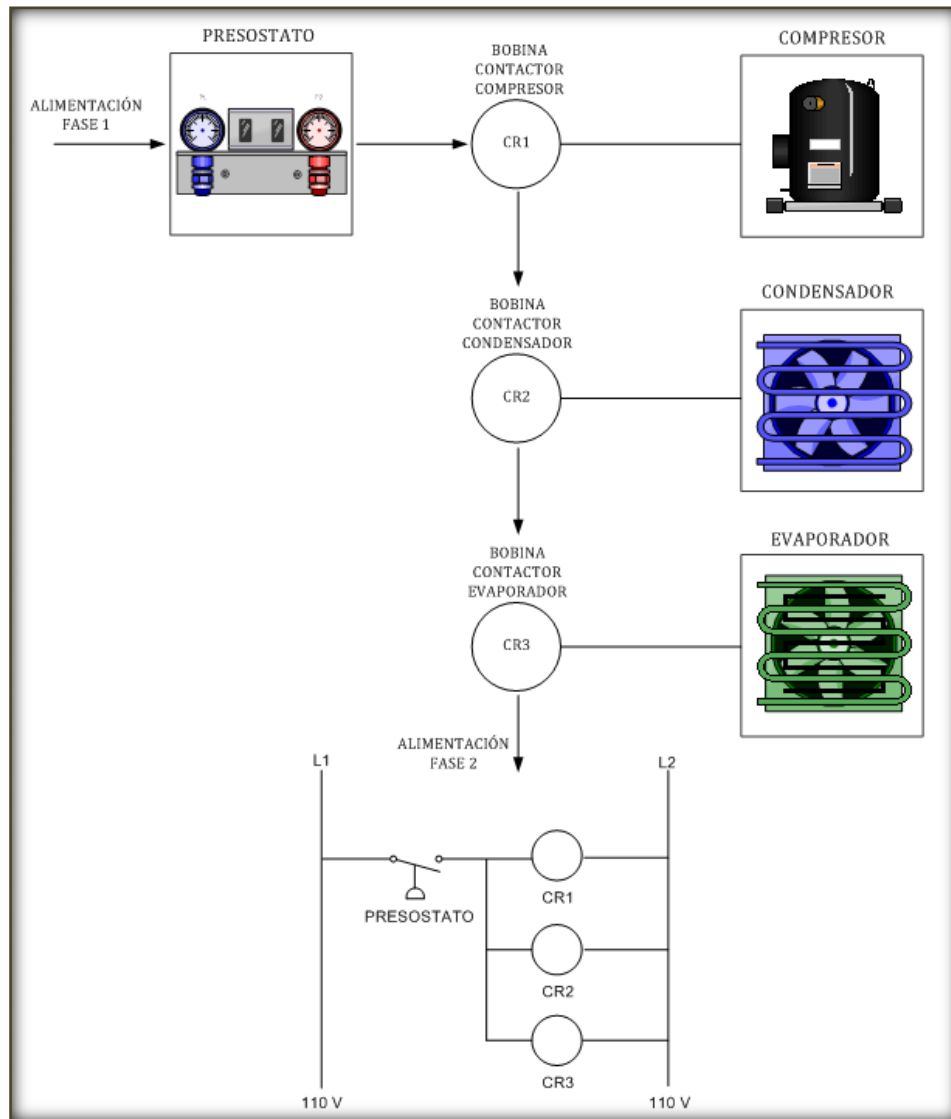
Fuente: Foto Danfoss<sup>3</sup> e imagen Formulario del frío.

Los controles de acción por presión, son de dos tipos: de acción a baja presión (conectan al lado de baja presión del sistema) y acción a alta presión (conectan en la descarga del compresor). Los controles a baja presión son los que se emplean

<sup>3</sup> Compañía Española dedicada a la producción y suministro de componentes hidráulicos y electrónicos.

en la estrategia de control ON-OFF para regular indirectamente la temperatura del ambiente interior del cuarto de conservación, los controles de alta presión se emplean por seguridad, solo desconectan el compresor en caso de que la presión del lado de alta del sistema sea excesiva<sup>4</sup>.

**Figura 11: Representación del control accionado por presostato.**



Fuente: Autores.

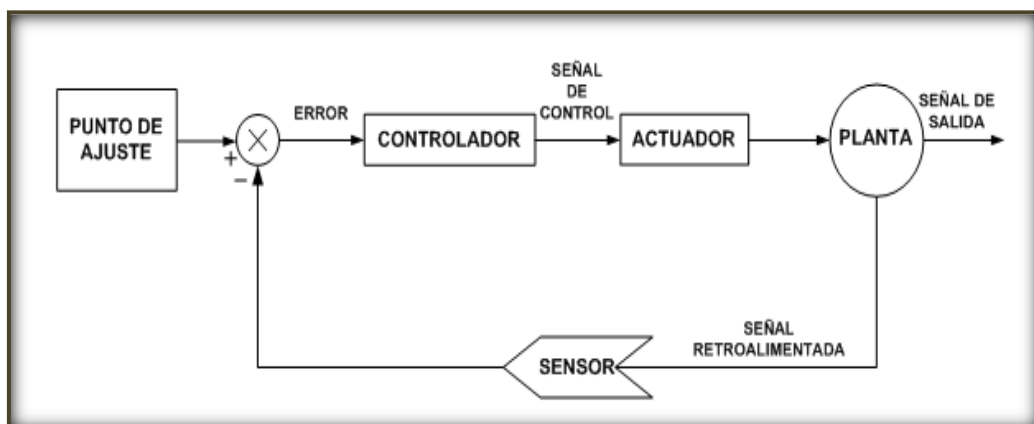
<sup>4</sup> Sacado del proyecto de grado Cuantificación del ahorro energético al utilizar una estrategia de control continuo con respecto a la utilización de una estrategia de control ON-OFF, para un sistema de refrigeración.

El presostato de baja presión actúa abriendo el circuito de control de los equipos cuando la presión en el lado de baja se reduce producto de un descenso en la temperatura del evaporador y cierra el circuito cuando la presión de baja ha aumentado como resultado de la diferencia de temperatura establecida. La forma como se implementa la acción de control utilizando el presostato es igual a la que se plantea para el termostato (Ver figura 11).

**1.3.2 Estrategia de control continuo.** La estrategia de control continuo básicamente es un lazo cerrado que permite mantener la variable de control constante, retroalimentando el valor sensado de la variable del proceso al controlador para que este tome una decisión, que en el caso de los sistemas de refrigeración será aumentar o disminuir las RPM para aumentar o disminuir a su vez la capacidad del sistema y mantener así constante la temperatura de vaporación.

Esta estrategia maneja ciertos términos que serán definidos a continuación y los cuales se pueden ver gráficamente en el diagrama de bloque de la figura 12.

**Figura 12: Modelo general del sistema de control continuo**



Fuente: Autores.

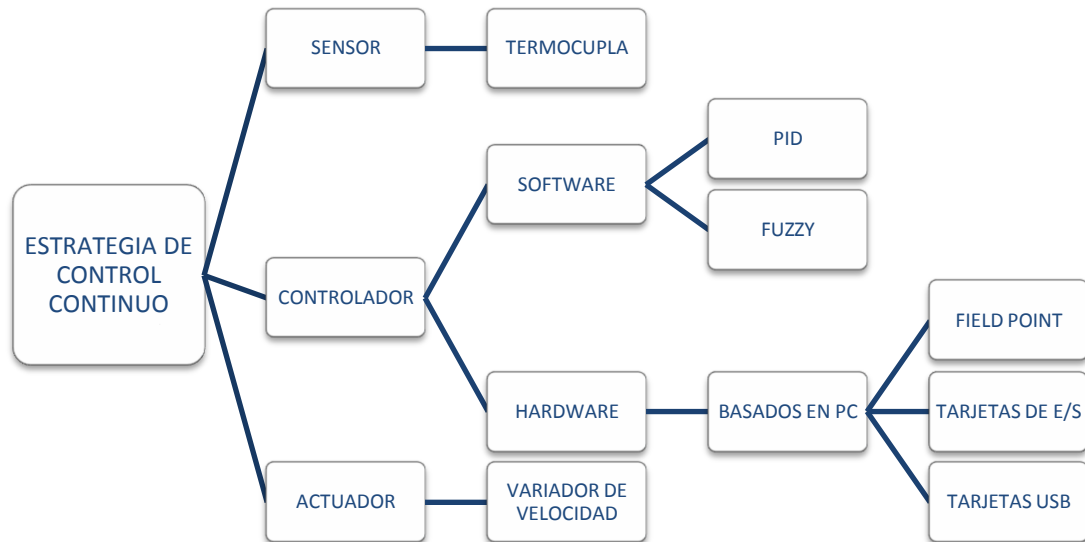
- **Variable de proceso:** Es el parámetro que se desea controlar, puede ser temperatura, presión, velocidad entre otros.
- **Punto de ajuste:** También llamado set point o parámetro de referencia, es el valor deseado del parámetro que se quiere controlar, por ejemplo una temperatura de vaporación de 0°C.
- **Controlador:** Determina la salida de un actuador en el sistema, compara el valor medido con el valor deseado, con base en esta comparación el decide qué hacer para mantener la variable en el valor que se desea.
- **Actuador:** Es un dispositivo que sirve para regular la variable de control y tomar una acción en función de ciertos parámetros, un actuador muy común cuando se desea variar RPM es el variador de velocidad.
- **Planta:** Proceso dinámico en el cual la variable del proceso es afectada por la salida del controlador, o sea, el sistema de refrigeración.
- **Sensor:** Es el elemento de medición de parámetros o variables del proceso.

El modelo general del control continuo está compuesto por tres elementos principales: el sensor, el controlador y el actuador (Ver figura 13).

La importancia de estos elementos radica en que realizan tres tareas básicas en cualquier sistema de control:

- Medir (sensor) la variable de control.
- Decidir (controlador) con base en la medición que hacer para mantener la variable de control en el valor deseado.
- Actuar (actuador) como resultado de la decisión del controlador efectuando una acción en la planta o sistema.

**Figura 13: Cuadro sinóptico del modelo general de la estrategia de control continuo**



Fuente: Autores.

**1.3.2.1 Sensor:** Las termocuplas son el sensor de temperatura más usado industrialmente. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck<sup>5</sup>) del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura. Existe muchos tipos de termocuplas pero las mas comunes se presentan en la tabla 1.

<sup>5</sup> El **efecto Seebeck** es una propiedad termoeléctrica descubierta en 1821 por el físico alemán Thomas Johann Seebeck. Este efecto convierte una diferencia de temperatura en electricidad.

**Tabla 1: Tipos de termocuplas**

<b>TERMOCUPLA</b>	<b>Cable aleación (+)</b>	<b>Cable aleación (-)</b>	<b>Rango Temperatura (°C)</b>	<b>Voltaje (mV)</b>
J	Hierro	Cobre/Níquel	-180 - 750	42.2
K	Níquel/Cromo	Níquel/Aluminio	-180 - 1372	54.8
T	Cobre	Cobre/Níquel	0 - 1767	20.8
R	87% Platino 13% Rhodio	100% Platino	0 - 1767	21.09
S	90% Platino 10% Rhodio	100% Platino	0 - 1767	18.68
B	70% Platino 30% Rhodio	94% Platino 6% Rhodio	0 - 1820	13.814

Fuente: Autores.

**1.3.2.2 Controlador:** Este elemento es el cerebro del control, esta compuesto por un software y hardware que permiten analizar las señales de entrada generalmente análogas para posteriormente de acuerdo a la decisión del controlador, traducirla en unas señales análogas o digitales que el actuador transformará en una acción.

**a. Software:** Por medio de un software o programa se puede realizar la programación del controlador que se desee usar. Otras denominaciones utilizadas para referirse al software de control son: software de supervisión, software para adquisición de datos, software para control de procesos. Los controladores mas usados son el PID y la lógica fuzzy.

- ✓ **Control continuo con PID.** El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

El control PID reúne tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Matemáticamente es la combinación de los tres controles mencionados (P, I y D):

$$u(t) = K_p \times \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.4)$$

Donde:

$u(t)$ : Salida del controlador.

$K_p$ : Ganancia proporcional.

$T_i$ : Tiempo integral.

$T_d$ : Tiempo derivativo.

$e(t)$ : Señal de error.

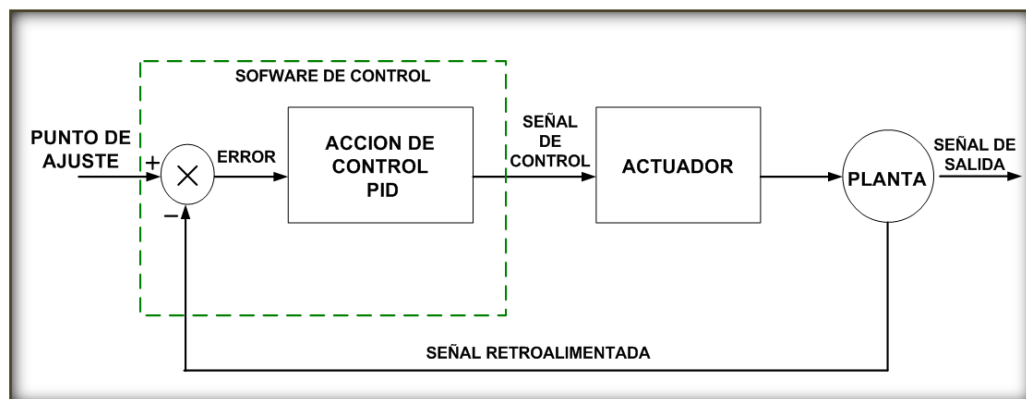
La contribución de cada una de las acciones en el control es:

- Acción proporcional: Estabiliza la oscilación natural de la variable controlada. Elimina además el grado de inestabilidad introducido por las acciones integral y derivativa.
- Acción integral: Proporciona una corrección o reajuste para compensar las variaciones de la carga y mantener la variable controlada sobre el punto de consigna.

- Acción derivativa: Anticipa el efecto de la proporcional con el fin de estabilizar más rápidamente la variable controlada después de cualquier cambio en el proceso.

En la figura 14 se puede observar el diagrama de bloque de un controlador PID donde se tiene un punto de ajuste que es comparado con una señal retroalimentada para generar un error que se trata de disminuir mediante el uso del control PID y este envía una señal que se transmite del actuador a la planta donde se produce una nueva señal de retroalimentación hasta que el error sea cero.

**Figura 14: Diagrama de bloque de un control PID**



Fuente: Autores.

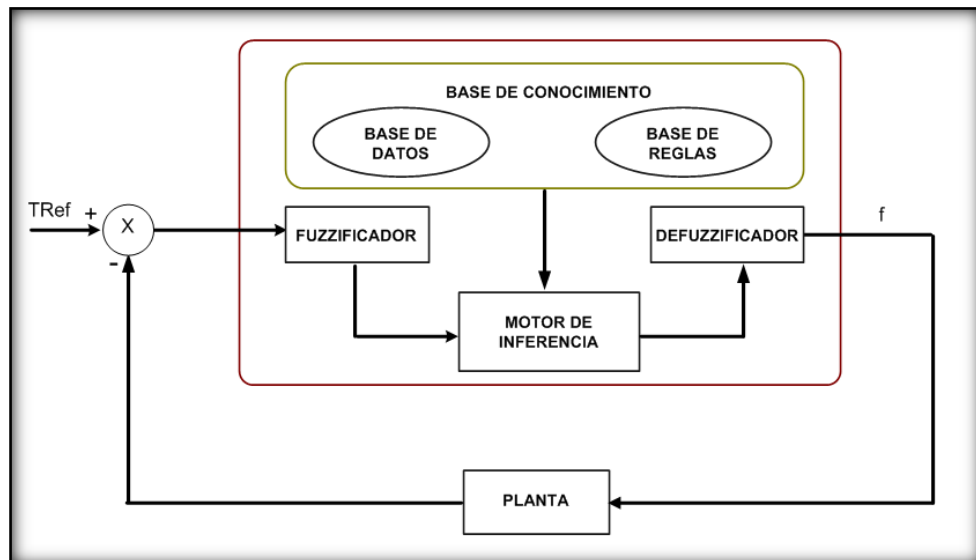
- ✓ **Control continuo con lógica fuzzy.** Un controlador fuzzy es aquel que incorpora el conocimiento de un experto humano sobre como manipular el proceso.

La lógica difusa o lógica fuzzy descansa en la idea que en un instante dado, no es posible precisar el valor de una variable, sino tan solo conocer el grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos en que se ha participado el rango de variación de la variable. El grado de pertenencia se cuantifica

mediante la función de pertenencia, que normalmente se escoge de una forma triangular o trapezoide.

En el sistema de control el sistema de lógica fuzzy que más se utiliza es el que consiste en utilizar un fuzzificador a la entrada y defuzzificador a la salida, como se observa en la figura 15.

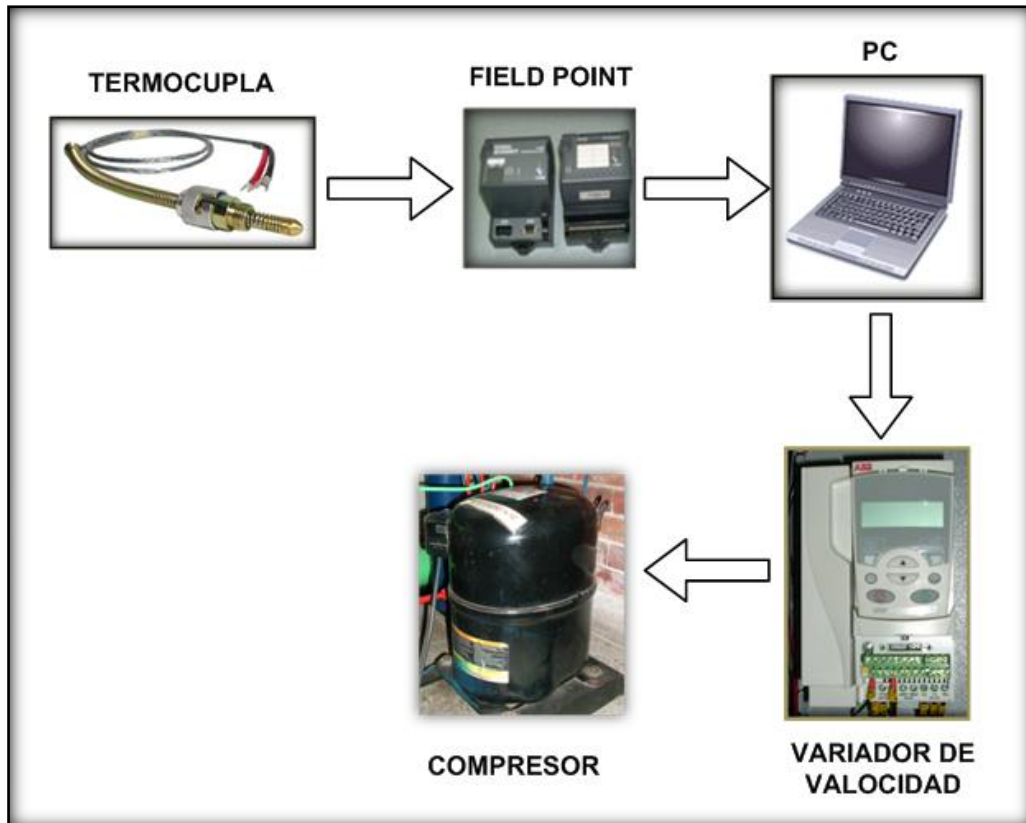
**Figura 15: Diagrama de bloque de un control con lógica fuzzy**



Fuente: Autores.

**b. Hardware:** una implementación de un control basado en PC (Ver figura 16) necesita unos dispositivos de entrada y salida que permitan adquirir y transferir señales entre el computador y el sistema que se esté controlando.

**Figura 16: Estrategia de control continuo basado en PC**



Fuente: Autores.

Ni la computadora ni el software permiten la conexión de elementos de campo en forma directa. Para ello se utilizan dispositivos de E/S, denominación genérica de los equipos digitales que toman la señal del instrumento de campo, la digitalizan, multiplican y la transmiten a la PC generalmente por medio del cable de conexión RS-232. Para intercambiar los datos entre el proceso y el computador se usan mecanismos como los descritos en la tabla 2.

**Tabla 2: Mecanismos de adquisición de datos**

FOTO	DESCRIPCIÓN
<p style="text-align: center;">FIELD POINT</p> 	<p>Hardware modular de entradas y salidas analógicas y digitales conectadas al PC por medio del cable RS-232.</p>
<p style="text-align: center;">TARJETAS DE E/S PARA ADQUISICIÓN DE DATOS</p> 	<p>Estas tarjetas son usadas en sistemas de bajo costo. No tienen ningún tipo de inteligencia para el control. Cumplen la misma función que el Field point pero dejan de ser un sistema distribuido modular y se convierten en tarjetas especiales para cada tipo de señal en particular.</p>
<p style="text-align: center;">TARJETA USB</p> 	<p>Este dispositivo tiene las mismas funciones que el Field Point normal lo que cambia es el sistema de conexión entre este y el PC ya que usa un puerto USB.</p>

Fuente: Autores.

**1.3.2.3 Actuator:** Los actuadores más usados en la estrategia de control continuo son los variadores de velocidad, también llamados convertidores de frecuencia variable (CFV). Un variador de velocidad es un dispositivo eléctrico que se utiliza para controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico de CA estándar. El número de polos del motor y la frecuencia que se le aplica, determinan su velocidad base.

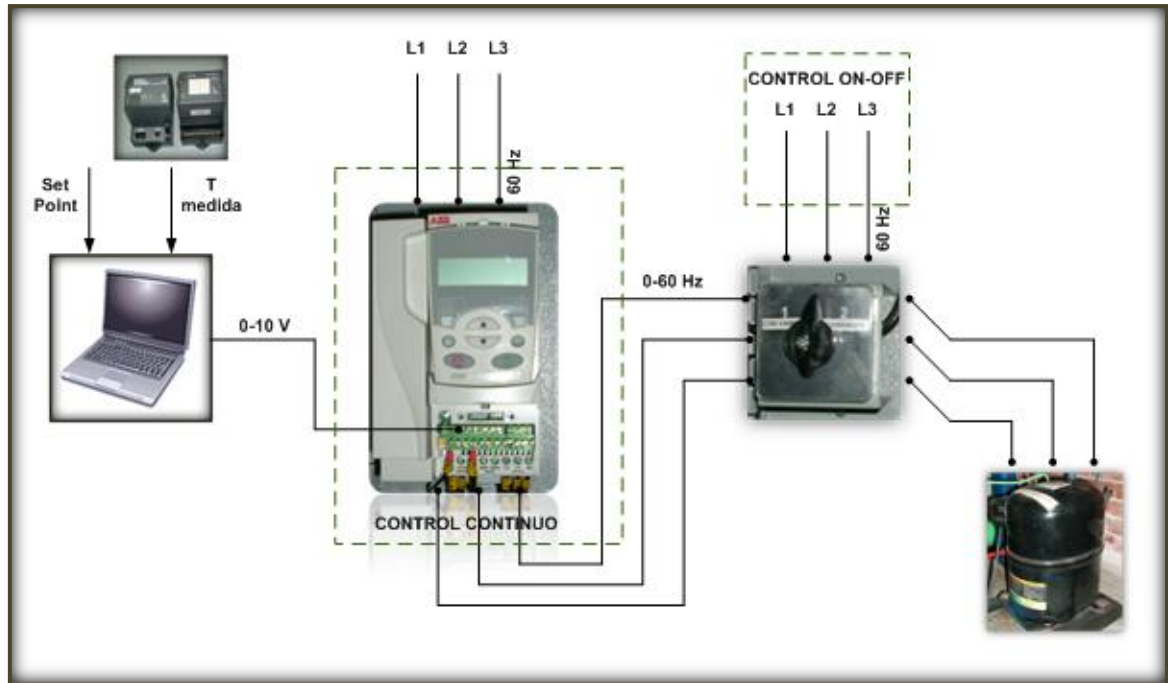
Es posible ajustar fácilmente la velocidad del motor modificando la frecuencia aplicada. También es posible cambiar la velocidad del motor ajustando el número de polos, pero esto conlleva a la transformación física del motor. Sería necesario efectuar un rebobinado y el resultado alteraría drásticamente la velocidad base. Por lo tanto, por razones de comodidad, rentabilidad y precisión, se cambia la frecuencia (y la tensión) por medio de este dispositivo.

#### **1.4 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA CONSUMIDA EN CADA ESTRATEGIA DE CONTROL**

La manera como se determina la potencia demandada por el compresor y el consumo de energía del mismo para cada estrategia de control es diferente, debido a los armónicos que se generan en la estrategia de control continuo ocasionados por el variador de velocidad. En la figura 17 se puede observar una manera para implementar las dos estrategias haciendo uso de un selector que nos permita escoger entre el control continuo y el control ON-OFF.

En un circuito eléctrico para su funcionamiento se puede encontrar tres tipos de potencia: la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente. Dentro de estas tres potencias la más importante es la potencia activa, pues esta multiplicada por el tiempo de funcionamiento del sistema nos da la energía consumida por el mismo y por lo tanto el costo que implica el consumo de esta energía.

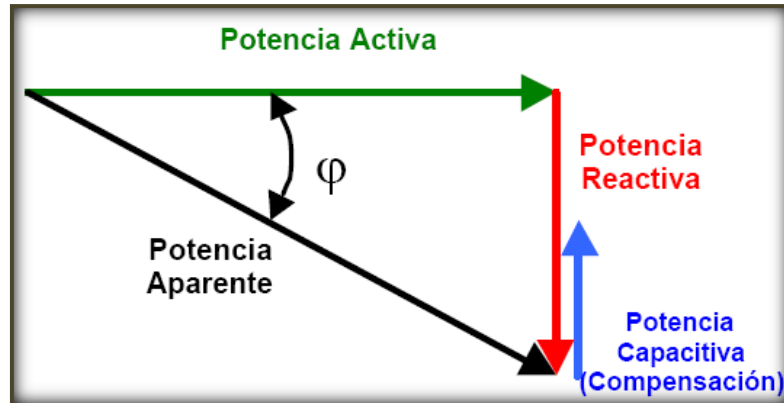
**Figura 17: Circuito de control del cuarto frío**



Fuente: Autores.

Los tres tipos de potencia mencionados anteriormente se encuentran relacionadas por el triángulo de potencias que se encuentra en la figura 18. Como se puede observar en el triángulo de potencias aparece el término  $\cos \phi$  llamado factor de potencia, que es un indicador del correcto uso del aprovechamiento de la energía eléctrica. El factor de potencia toma valores entre 0 y 1, aunque lo adecuado es que se encuentre entre 0,90 y 1. Cuando se tiene un factor de potencia bajo (menor a 0.90) implica que hay demasiada potencia reactiva, es decir, que se está desaprovechando energía, lo cual el estado penaliza. Esto también provoca daños por sobrecargas, pérdidas por recalentamiento, alteraciones en la calidad del suministro y disminución del rendimiento y funcionamiento de los equipos. Por ejemplo, si se tiene un factor de potencia de 0.95 indica que solo el 95% de la energía abastecida es aprovechada mientras que el 5% restante se desaprovecha.

Figura 18: Triangulo de potencias



Fuente: Autores.

Matemáticamente estas potencias se definen:

- Potencia aparente

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \text{ Volt} - \text{Amper}[\text{VA}] \quad (1.4)$$

- Potencia activa

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \text{ Watts} [W] \quad (1.5)$$

- Potencia reactiva

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi \text{ Volt} - \text{AmperReactivo} [\text{VAr}] \quad (1.6)$$

Cuando el factor de potencia es bajo se debe hacer una compensación, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{faltante} = (\tan \phi_{actual} - \tan \phi_{deseada}) \times P \quad (1.7)$$

Donde:

V: Tensión en las líneas

I: Corriente en las líneas

$\cos \phi$ : Factor de potencia

$Q_{faltante}$ : Potencia capacitiva faltante [KVAR]

#### 1.4.1 Con la estrategia de control ON-OFF:

Para determinar la potencia demandada por el compresor en el control ON-OFF se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = \sqrt{3} \times I_{rms} \times V_{rms} \times \cos \phi \quad (1.8)$$

#### 1.4.2 Con la estrategia de control continuo:

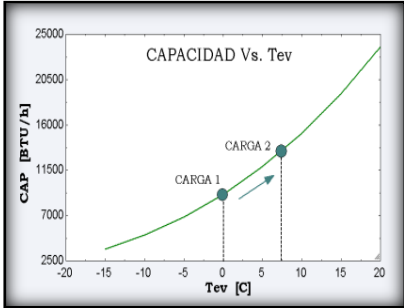
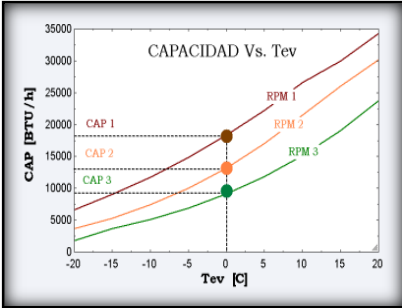
La potencia en este tipo de control a diferencia del control ON-OFF es variable en el tiempo, es por eso que es necesario realizar una sumatoria de las diferentes potencias obtenidas a cada momento. Para su medición se debe contar con un equipo que tenga en cuenta los armónicos que genera el funcionamiento del variador de velocidad. Matemáticamente se tendría:

$$P = \frac{1}{T} \int P(t) \times dt = \sum_{K=1}^N V_{rmsK} \times I_{rmsK} \times \cos \phi_K \quad (1.9)$$

### 1.5 PARALELO ENTRE EL CONTROL CONTINUO Y ON-OFF EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

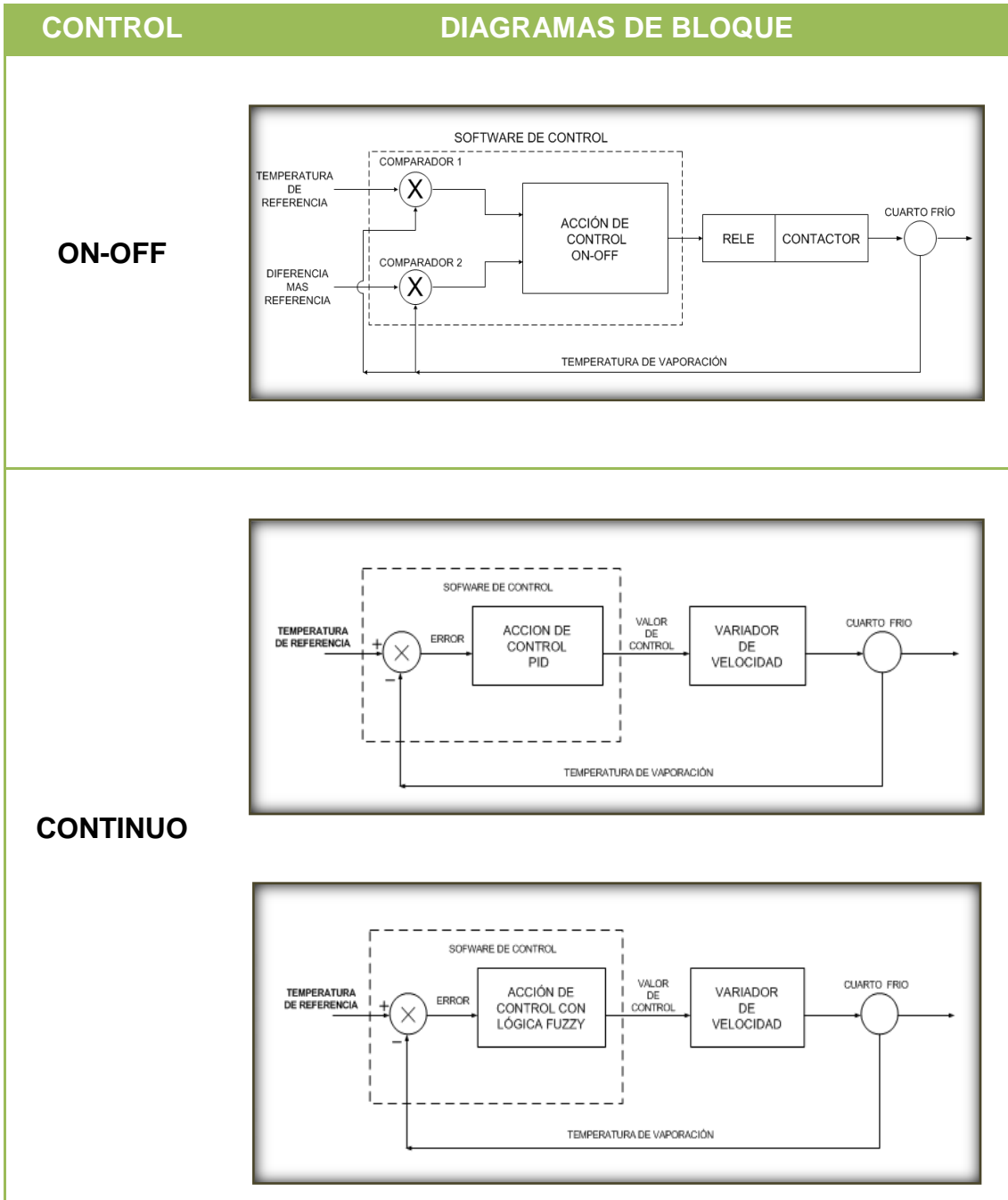
En la tabla 3 se hace un paralelo entre las dos estrategias de control manejadas en los sistemas de refrigeración respecto a seis parámetros: Variación de la capacidad, costos de implementación, RPM manejadas, Temperatura, capacidad, vida útil del compresor y consumo de energía. También se muestran en la tabla 4 los diagramas de bloque de los dos tipos de control manejados: control ON-OFF y control continuo.

**Tabla 3: Paralelo entre la estrategia ON-OFF y la estrategia de control continuo**

PARAMETRO	TIPO DE CONTROL	
	ON-OFF	CONTINUO
<b>Graficas</b>		
<b>Costos</b>	Debido a los componentes que presenta su costo no es elevado.	Por la tecnología que manejan sus componentes sus costos son elevados
<b>RPM</b>	Constante o cero.	Aumentan o disminuyen dependiendo de la carga térmica.
<b>Temperatura</b>	Mantiene la temperatura de control dentro de un rango.	La temperatura de control permanece constante o muy cercana a la de referencia.
<b>Capacidad</b>	La regula por medio de la conexión y desconexión de equipos.	Regula la capacidad cambiando las rpm por medio de un variador de velocidad.
<b>Vida útil del compresor</b>	Se da un desgaste del compresor por los arranques y paradas, más aún cuando el rango de variación de temperaturas es pequeño.	Hay menos desgaste del compresor pues no hay arranques ni paradas.
<b>Energía</b>	Se maneja la misma potencia independiente de la carga, lo que aumenta el consumo de energía.	El variador permite que la potencia demanda vaya de la mano con la carga, produciendo un ahorro de energía.

Fuente: Autores.

**Tabla 4: Diagramas de bloque de las estrategias de control**

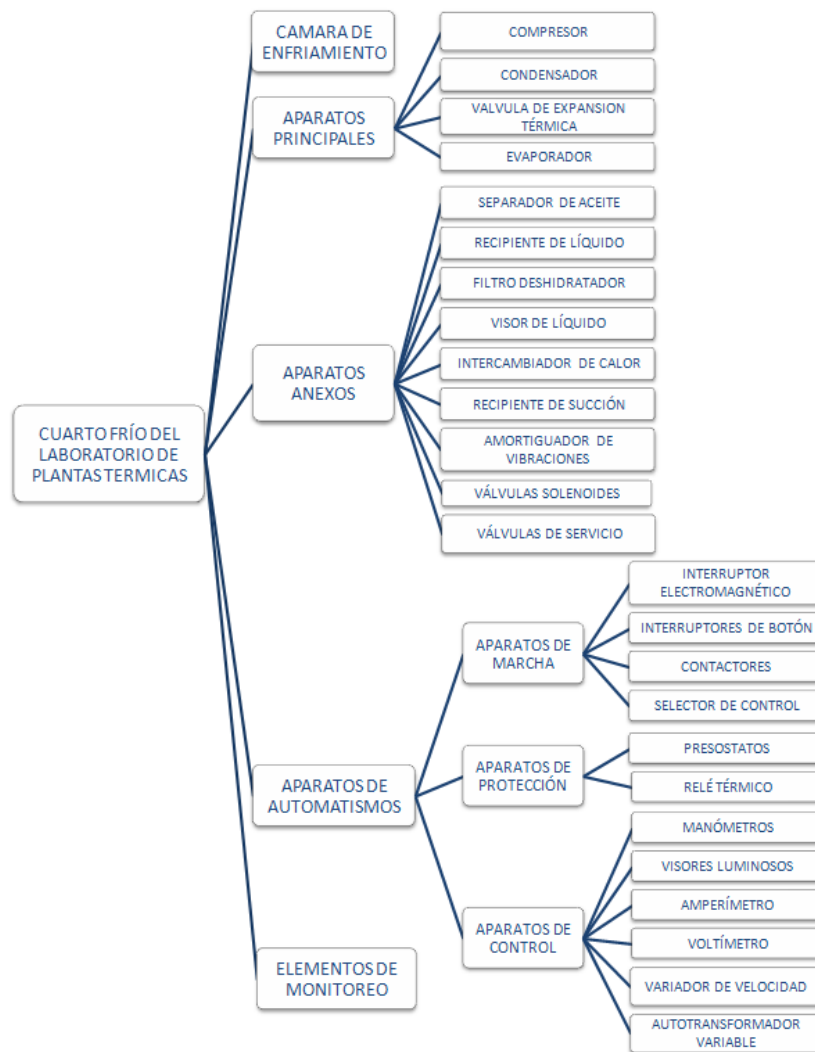


Fuente: Autores.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL CUARTO FRÍO DEL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN

En la figura 19 se muestra un resumen de los diferentes componentes que tiene el cuarto frío del laboratorio de refrigeración y de los cuales se hará una breve descripción en este capítulo.

**Figura 19: Cuadro sinóptico de los componentes del cuarto frío**

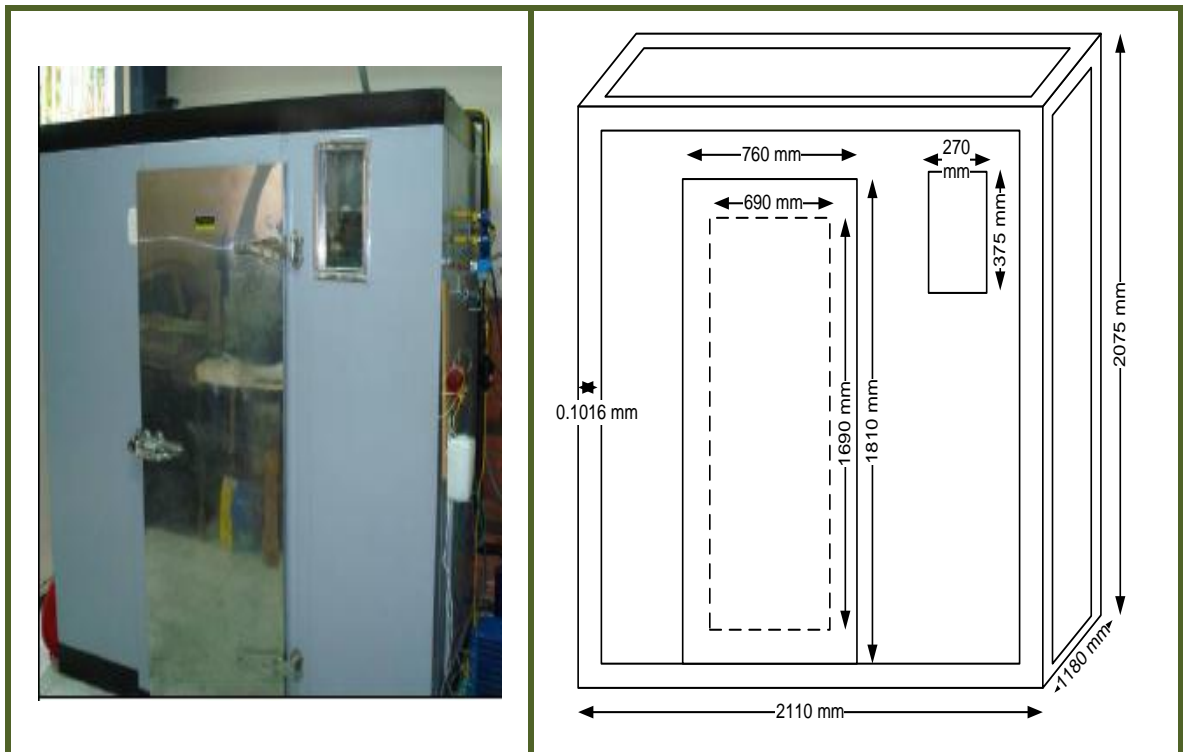


Fuente: Autores.

## 2.1 CAMARA DE ENFRIAMIENTO

La cámara de enfriamiento (Ver figura 20) es el lugar donde se alojará el producto para su conservación de acuerdo a una temperatura determinada por las propiedades del mismo. Sus paredes están formadas por un aislante que en este caso es poliuretano, dentro de el se encuentran ciertos componentes como son el evaporador, intercambiador de calor, VET<sup>6</sup>, resistencias de calentamiento y algunas termocuplas. La puerta se encuentra ajustada con empaquetaduras y con un aislamiento igual al de las paredes de la cámara. Las características técnicas de la cámara de enfriamiento se encuentran en el anexo A.

**Figura 20: Cámara de enfriamiento del cuarto de frío del laboratorio de refrigeración**



Fuente: Autores.

<sup>6</sup> VET: Válvula de expansión Termostática.

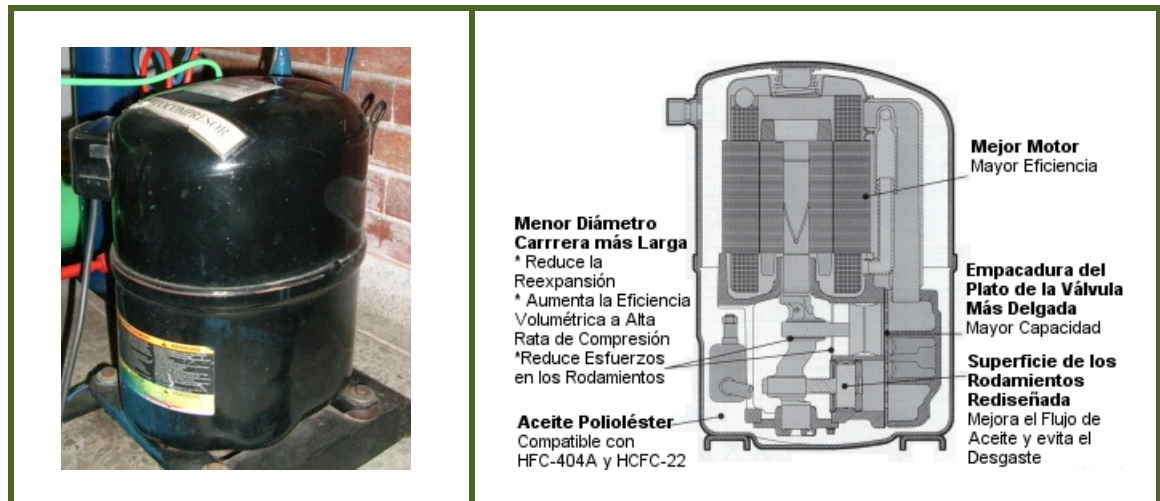
## 2.2 APARATOS PRINCIPALES DEL CUARTO FRÍO

Un sistema de refrigeración está compuesto básicamente por cuatro elementos: Evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión. A continuación se describirá estos elementos del cuarto frío del laboratorio de refrigeración.

### 2.2.1 Motocompresor hermético de pistones

La tarea principal del compresor en el circuito de refrigeración es succionar vapor del lado de baja presión y comprimirlo para descargarlo hacia el lado de alta presión. En la figura 21 se puede observar los componentes internos del compresor hermético Copeland.

**Figura 21: Compresor hermético Copeland**




Fuente: Foto autores, imagen Emerson Climate<sup>7</sup>.

El compresor cuenta con un motor trifásico que consta de un embobinado perfectamente balanceado, por el cual circula una corriente alterna, cada fase produce un campo magnético oscilatorio. Los tres ejes de los campos están

<sup>7</sup> Empresa con amplia experiencia en la industria de Calefacción, Ventilación, Aire Acondicionado y Refrigeración local.

desfasados eléctrica y físicamente 120° y su dirección es constante. El estator está alojado en el cárter, el rotor se encuentra unido al árbol que mueve el compresor, este eje gracias al movimiento de una biela transforma el movimiento de rotación del árbol en movimiento alternativo de los 2 pistones que posee el compresor. Un plato de válvulas permite la aspiración y descarga de los vapores del refrigerante. Debido a las diferencias de velocidad que se producen el aceite se distribuye rápidamente a los puntos principales que deben lubricarse gracias a los orificios taladrados para este fin, el excedente expulsado en la parte superior del árbol se pulveriza a la salida volviendo a caer en el fondo de la cuba.

**Tabla 5: Nomenclatura del compresor hermético Copeland**

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN							
 <p data-bbox="414 1564 893 1690"><b>CS12K6E-TF5-551</b></p>	Serie de la familia de los compresores COPELAND.							
	<b>Código:</b> Media temperatura							
	<b>Capacidad nominal:</b> 12000 Btu/h, Ver Anexo B.							
	<b>Multiplicador de capacidad:</b> 1000.							
	<b>Variación del modelo:</b> indica el modelo dentro de la serie.							
	<b>Lubricado:</b> aceite polioéster.							
	<b>Tipo de motor:</b> trifásico.							
	<b>Tipo de protección del compresor:</b> protector accionado con contactor.							
	<table border="1" data-bbox="1084 1539 1385 1644"> <tr> <td data-bbox="1084 1539 1230 1581"><b>Códigos eléctricos:</b></td> <td data-bbox="1230 1539 1385 1581">60 Hz</td> <td data-bbox="1385 1539 1385 1581">50 Hz</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1084 1581 1230 1644"></td> <td data-bbox="1230 1581 1385 1644">200/230-3</td> <td data-bbox="1385 1581 1385 1644">200/240-3</td> </tr> </table>		<b>Códigos eléctricos:</b>	60 Hz	50 Hz		200/230-3	200/240-3
	<b>Códigos eléctricos:</b>	60 Hz	50 Hz					
	200/230-3	200/240-3						
<b>Variaciones del producto:</b> indica la configuración del compresor y los accesorios que incluye.								

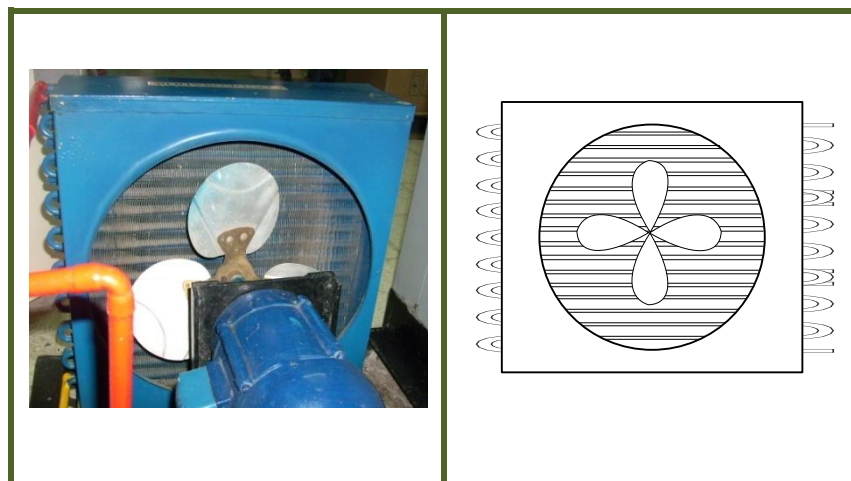
Fuente: Autores.

La serie del compresor del cuarto de refrigeración es CS12K6E-TF5-551 la cual se explica detalladamente en la tabla 5, los demás datos técnicos del compresor se encuentran en el anexo A.

### 2.2.2 Condensador

El condensador es un intercambiador térmico que se usa para transmitir al medio de enfriamiento (aire) el calor de los vapores descargados por el compresor. El condensador recibe vapor caliente a alta presión del compresor, lo enfría y lo regresa en estado líquido. Este enfriamiento lo realiza por medio de aire forzado debido a un ventilador. El condensador posee un intercambiador de calor, por los tubos del mismo circula el vapor caliente que descarga el compresor y por fuera de los tubos el aire atmosférico, los tubos son del tipo aleteado. La cantidad de calor a evacuar por el condensador es superior a la producida por el evaporador. Los datos técnicos del condensador del cuarto frío mostrado en la figura 22 se encuentran en el anexo A.

**Figura 22: Condensador del cuarto frío de refrigeración**



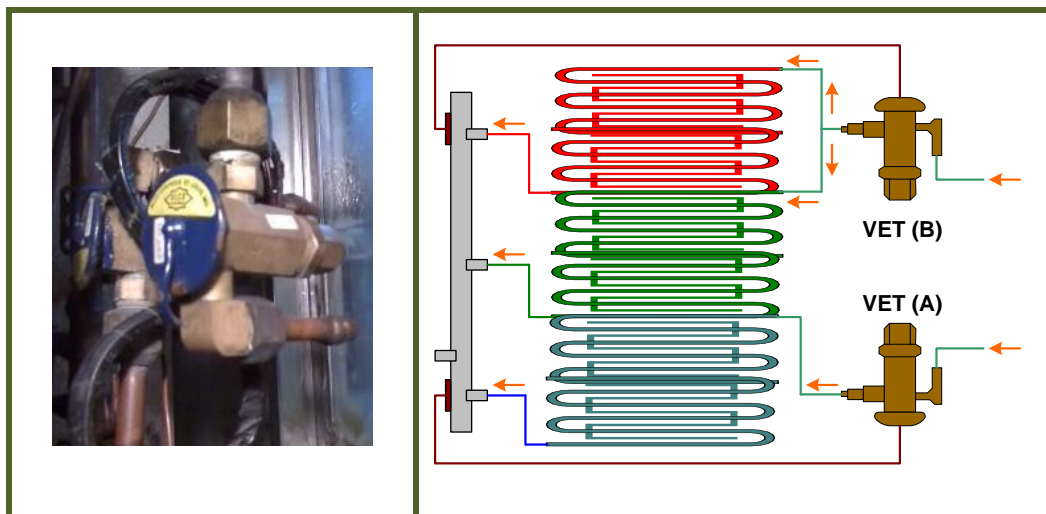
Fuente: Autores.

### 2.2.3 Válvula de expansión termostática

Las válvulas de expansión termostáticas se encargan de recibir líquido más o menos subenfriado procedente del condensador a la presión de condensación y convertir cierta parte de este líquido en vapor debido a la caída de presión hasta la de evaporación, por lo tanto a la salida de la VET tendremos una mezcla de líquido-vapor justo en la entrada del evaporador y debido al aporte de calor exterior ya sea del cuarto o del exterior, el líquido residente se evapora. Básicamente la VET se encarga de la alimentación constante y máxima del evaporador en todo momento del ciclo funcional.

El sistema cuenta con dos válvulas de expansión termostáticas que funcionan con refrigerante R-134a debido a la ramificación que presenta el evaporador del cuarto de refrigeración; la VET<sub>B</sub> se divide en dos conductos y alimenta la mayor parte del evaporador mientras que la VET<sub>A</sub> solo la tercera parte del evaporador. Esto se puede observar en la figura 23. Los datos técnicos de la VET se encuentran en el anexo A.

**Figura 23: Válvulas de expansión termostáticas del cuarto frío**



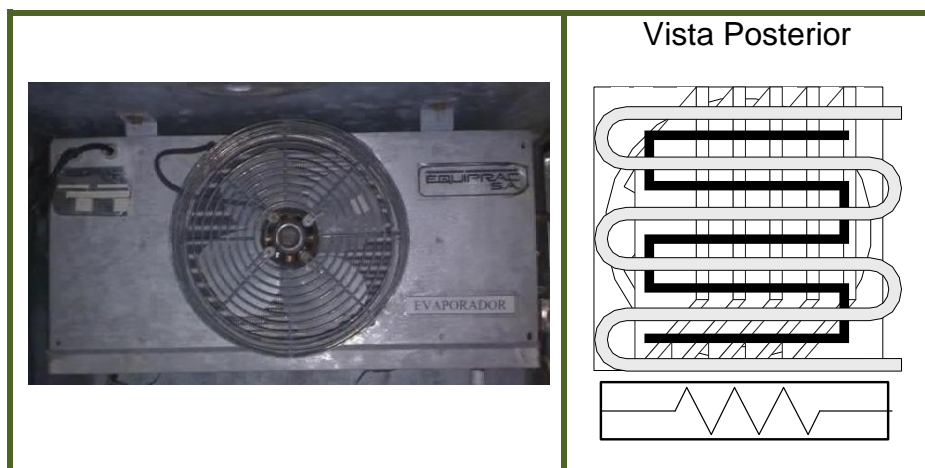
Fuente: Autores.

## 2.2.4 Evaporador

La tarea principal del evaporador es hacer que el calor retirado del cuarto de enfriamiento pase al refrigerante, absorbiendo este flujo a temperatura constante por liberación de su calor latente de evaporación.

El evaporador del cuarto de refrigeración es enfriado por aire. Está formado por un haz aleteado de tubo de cobre y aletas de aluminio. Este haz se forma por medio de un serpentín que permite la circulación del refrigerante a una velocidad que es apta para el retorno del aceite al compresor. El evaporador tiene una resistencia colocada bajo las aletas y bandeja de desagüe usada para el descarche, esta provoca la fusión del agua que tiende acumularse en la parte fría del evaporador que se halla a una temperatura inferior a los 0 °C y que se deposita allí en forma de escarcha; al mismo tiempo evita la formación de nueva escarcha. Esta escarcha produce una disminución de la temperatura de vaporación y con ello la capacidad de enfriamiento de la máquina, lo que hace que se aumente el tiempo de marcha, por eso es importante el proceso de descarche.

**Figura 24: Evaporador del cuarto frío**



Fuente: Autores.

En la figura 24 se puede observar el evaporador del cuarto frío del laboratorio de refrigeración y su figura esquemática. Las características técnicas de este evaporador se encuentran en el anexo A.

## **2.3 APARATOS ANEXOS AL CIRCUITO**

### **2.3.1 Separador de aceite**

Básicamente el separador de aceite se encarga de separar y retornar al cárter el aceite que sale del compresor junto con el refrigerante, ya que éste afecta especialmente a los intercambiadores (condensador y evaporador) disminuyendo la eficacia de dichos elementos. El flujo de aceite hacia el cárter, es provocado por la diferencia de presiones entre la alta presión del gas en el separador y la baja presión en el cárter. Siempre va a permanecer en el separador una pequeña cantidad de aceite, lo suficiente para que con otro poco que se acumule, se accione el mecanismo del flotador. La válvula de aguja operada por el flotador, está ubicada a cierta altura del fondo, para que solo aceite líquido sea regresado al compresor<sup>8</sup>. En la figura 25 se pueden observar un corte de este elemento. Este componente está instalado en la línea de descarga, entre el compresor (lo más cercano a este) y el condensador. Las características técnicas de este componente se encuentran en el anexo A.

Además de su función principal que es la de separar el aceite del gas refrigerante, el separador de aceite cumple con otros objetivos:

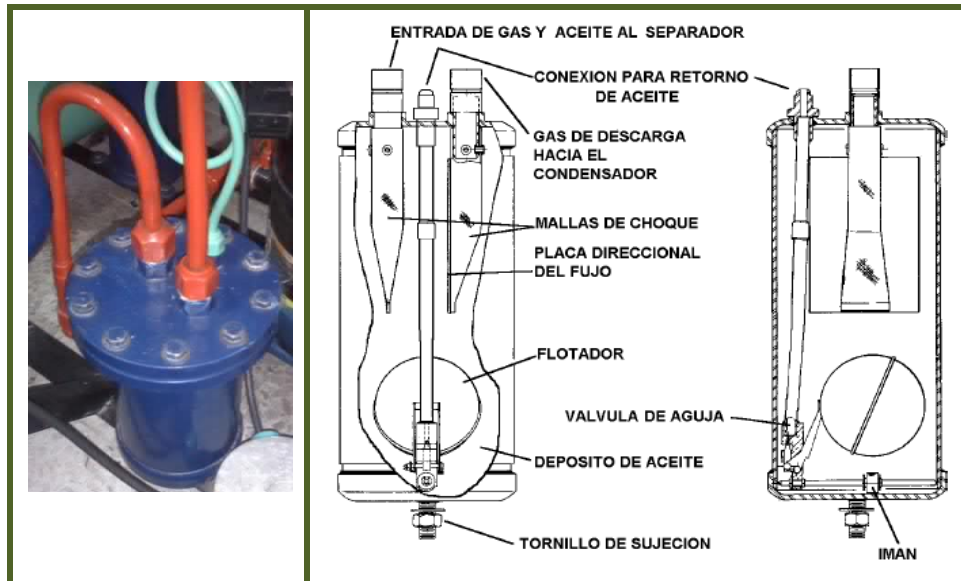
- Asegura una adecuada lubricación para el compresor.
- Reduce el nivel de ruido provocado por las pulsaciones.
- Disminuye el tiempo de trabajo del equipo y reduce el consumo de energía.

---

<sup>8</sup> Extraído del Manual Técnico de Valycontrol.

- Permite que la válvula de expansión opere a su máxima eficiencia reguladora.
- Asegura una transferencia de calor máxima y continua en el evaporador.

**Figura 25: Separador de aceite del cuarto frío**



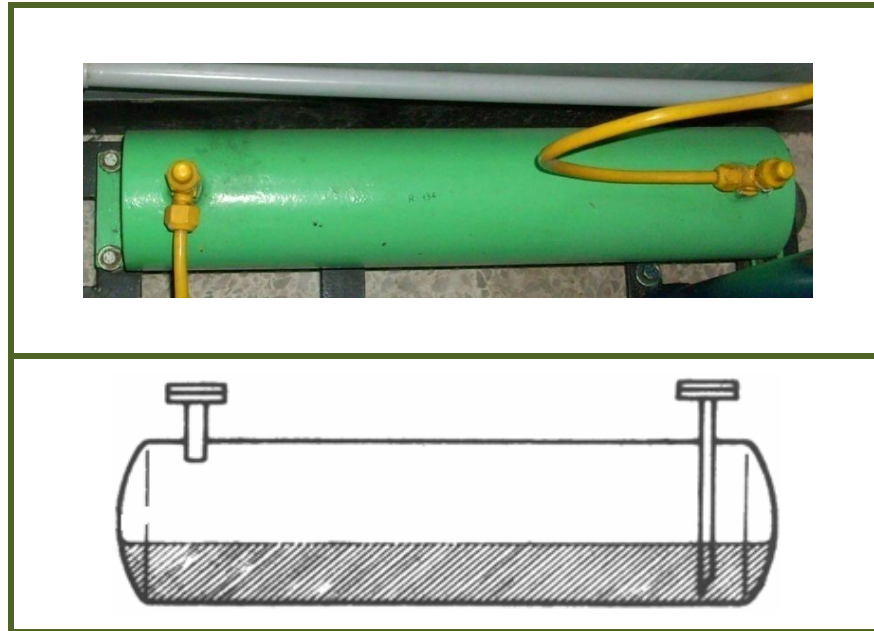
Fuente: Foto autores, imagen Manual Técnico de Valycontrol<sup>9</sup>.

### 2.3.2 Recipiente de líquido

El recipiente de líquido mostrado en la figura 26 se encarga de recibir el refrigerante que viene del condensador. Está montado en posición horizontal, consta de una válvula de salida de líquido con un tubo sumergido, que asegura la alimentación de líquido aunque su nivel dentro del recipiente sea muy bajo. El refrigerante licuado va directamente del condensador al evaporador, por eso el condensador debe tener capacidad suficiente para contener la carga de fluido, evitando de esta forma las sobrepresiones que podrían resultar de la obstrucción de la válvula de expansión. Las características se encuentran en el anexo A.

<sup>9</sup> Empresa Mexicana dedicada a la producción en el sector metalmeccánico.

**Figura 26: Recipiente de líquido del cuarto frío**

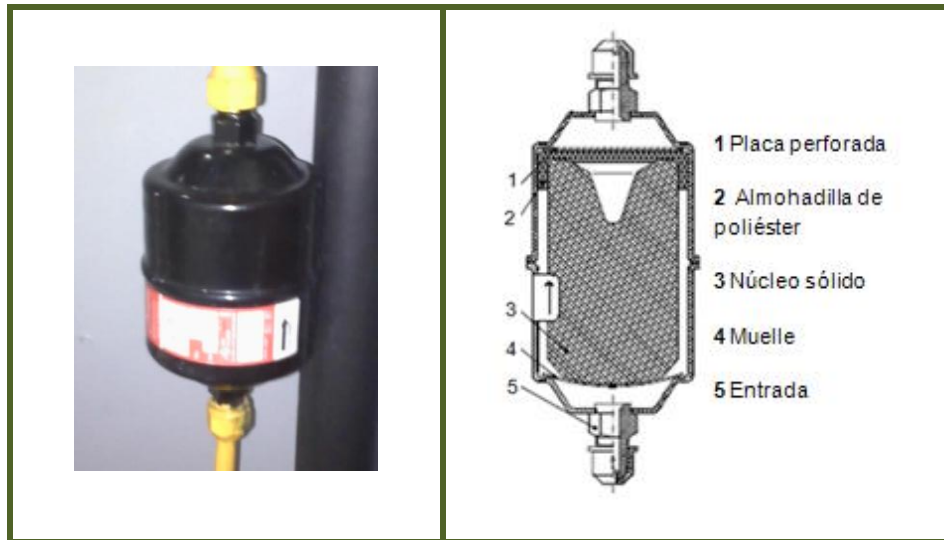


Fuente: Foto autores, imagen Instalaciones Frigoríficas Tomo 2.

### **2.3.3 Filtro deshidratador de la línea de líquido**

El filtro (Ver figura 27) se encuentra ubicado en la línea de líquido a la salida del tanque recipiente de líquido. Su función es retener la contaminación existente en el sistema (humedad, ácidos, suciedad, lodos, barnices, rebabas, ceras) que puedan causar daño al compresor o a otros elementos como la VET. Denominados también filtros secadores, mantiene el contenido de humedad del refrigerante por debajo de un valor máximo, que para R134a es de 75 ppm (mg H<sub>2</sub>O/Kg de refrigerante). El filtro se encuentra en posición vertical. Las características de este elemento se encuentran en el anexo A.

**Figura 27: Filtro deshidratador del cuarto frío**

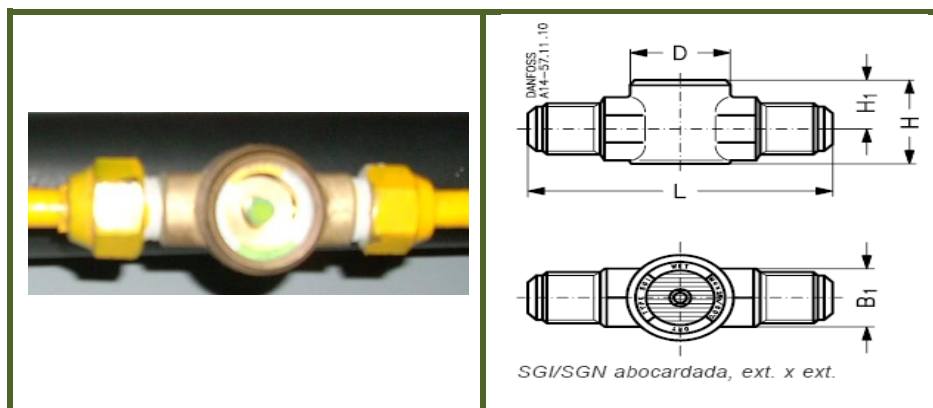


Fuente: Foto autores, imagen Danfoss.

### 2.3.4 Visor de líquido

La principal función del visor mostrado en la figura 28 es indicar el estado físico del refrigerante que circula por la instalación, o para indicar el nivel del líquido en el recipiente. Este dispositivo contiene una sal química higroscópica cuyo valor cambia en función de la humedad del refrigerante y que es reflejado en un color.

**Figura 28: Visor de líquido del cuarto frío**



Fuente: Foto autores, imagen Danfoss.

El indicador pasa de verde a amarillo cuando el contenido de humedad del refrigerante rebasa el valor crítico. La indicación de color es reversible, es decir, que el color vuelve a amarillo cuando la instalación ha sido secada. El comportamiento del visor se puede ver en la tabla 6. Los datos técnicos se encuentran en el anexo A.

**Tabla 6: Determinación del contenido de humedad de los refrigerantes HFC y HCFC<sup>10</sup>**

Refrigerantes HFC y HCFC						
	Contenido de humedad en ppm=partes por millón					
	SGN/ SGRN					
	25°C <sup>1</sup>			43°C <sup>1</sup>		
	Verde/seco	Color intermedio	Amarillo/húmedo	Verde/seco	Color intermedio	Amarillo/húmedo
<b>R 22</b>	<30	30-120	>120	<50	50-200	>200
<b>R 134a</b>	<30	30-100	>100	<45	45-170	>170
<b>R 404A</b>	<20	20-70	>70	<25	25-100	>100
<b>R 407C</b>	<30	30-140	>140	<60	60-225	>225
<b>R 507</b>	<15	15-60	>60	<30	30-110	>110
1) Estos valores son válidos para una temperatura de líquido de +25°C o de +43°C respectivamente.						

Fuente: catalogo Danfoss, visores de líquido.

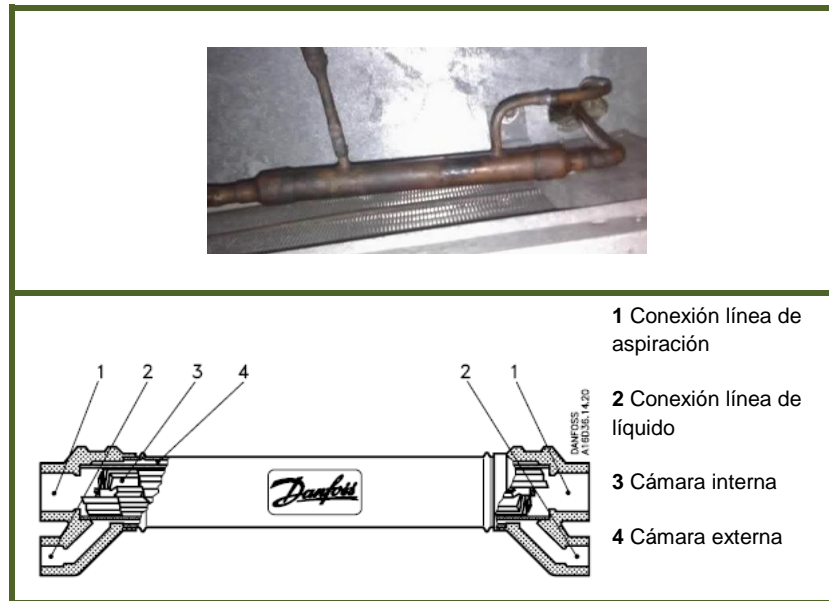
### 2.3.5 Intercambiador de calor

El intercambiador de calor mostrado en la figura 29 está colocado en el interior de la cámara de enfriamiento antes del evaporador para dar un mejor rendimiento al cuarto frío, pues permite la recuperación de calor entre el refrigerante caliente y el refrigerante frío, los cuales circulan a contracorriente; al igual asegura que a la

<sup>10</sup> HFC: Refrigerantes hidroflocarbonados como R-12, R-114, R-115 y HCFC: refrigerantes hidroclocarbonados como el R-22, R-23, R-152a, R-143a, R-125.

VET llegue únicamente líquido y que los vapores sobrecalentados lleguen al compresor. Los datos del intercambiador se encuentran en el anexo A.

**Figura 29: Intercambiador de calor del cuarto frío**

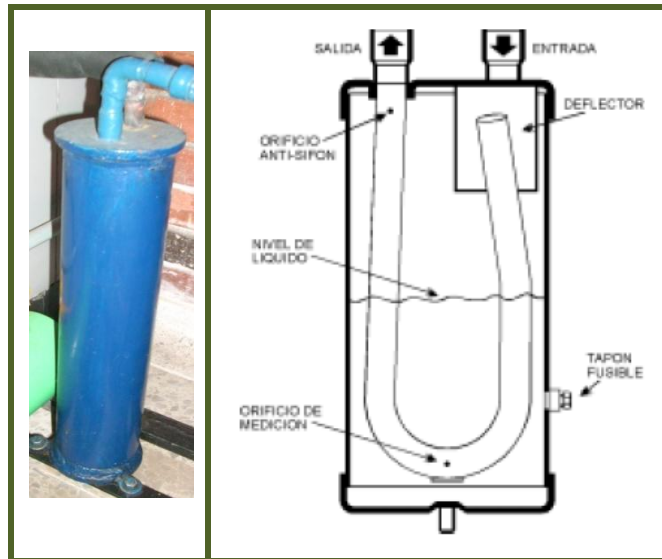


Fuente: Foto autores, imagen Danfoss.

### 2.3.6 Recipiente de succión

El recipiente de succión o botella antigolpes de líquido mostrado en la figura 30 está ubicado en la tubería de aspiración muy cerca al compresor y su principal función es impedir el paso de refrigerante o aceite líquido al compresor. Está montado en posición vertical. Básicamente la separación de los vapores con el líquido se debe a un cambio brusco de velocidad que se da por un aumento de sección. El líquido acumulado es reevaporado debido al calor aportado por el medio en el que se encuentra el recipiente de succión. Este elemento evita la posibilidad de un daño mecánico en el compresor, ya que los compresores están diseñados para comprimir vapor únicamente y tienen muy poca tolerancia para el refrigerante o aceite líquidos. Las dimensiones del recipiente de succión se encuentran en el anexo A.

**Figura 30: Recipiente de succión del cuarto frío**

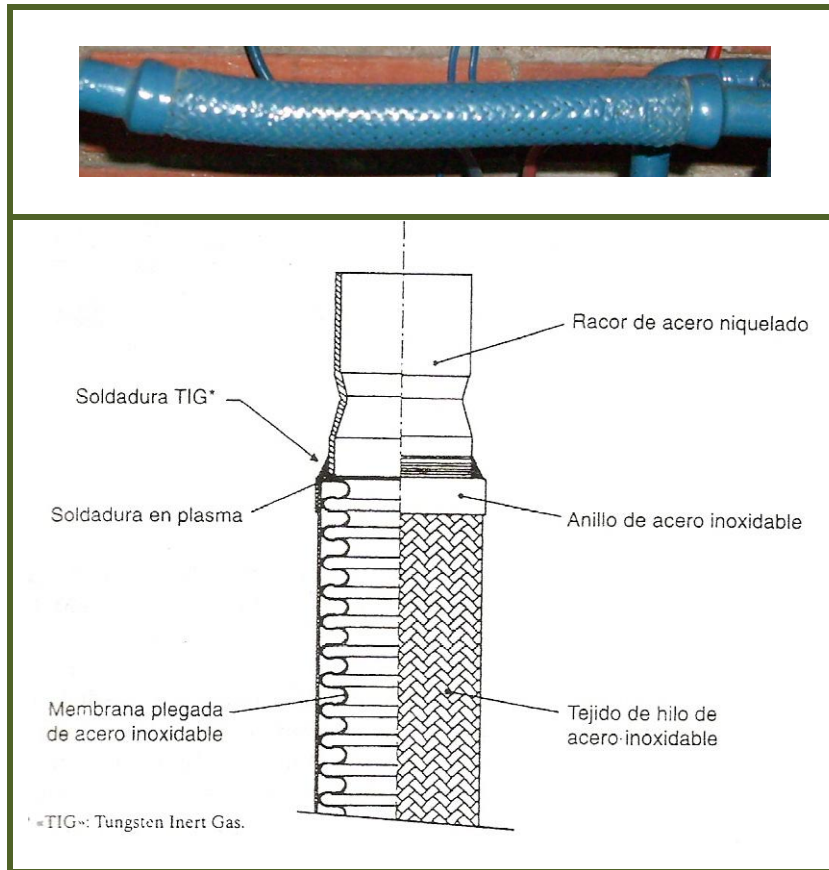


Fuente: Foto autores, imagen Manual Técnico de Valycontrol.

### **2.3.7 Amortiguador de vibraciones**

Este elemento permite reducir las vibraciones que se presentan en el circuito de refrigeración, amortiguando el ruido y absorbiendo tensiones internas causadas por dilataciones y contracciones de las tuberías. Así se puede eliminar la posibilidad de ruptura de la tubería debido a los esfuerzos producidos durante el arranque o la parada del compresor. En la figura 31 se puede observar las partes que componen un amortiguador de vibraciones. El amortiguador está colocado en la parte recta de la tubería en sentido horizontal sin estar sujeto a tensión, elongación o compresión axial. Se encuentra formado por un tubo metálico flexible ondulado cuyas ondas paralelas se extienden alrededor del tubo. Las dimensiones del amortiguador se encuentran en el anexo A.

**Figura 31: Amortiguador de vibraciones del cuarto frío**

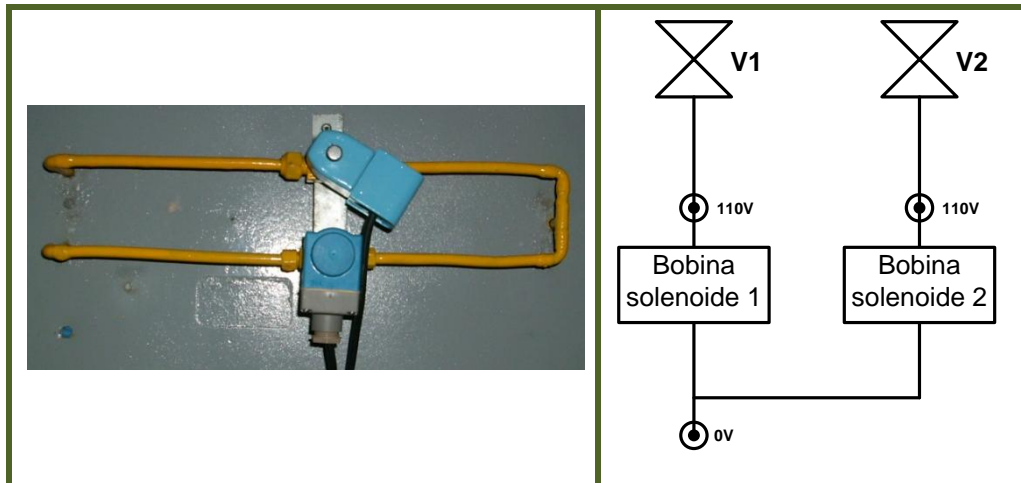


Fuente: Foto autores, imagen Formulario del Frío.

### **2.3.8 Válvulas solenoides**

Es un dispositivo operado eléctricamente cuya función es cortar o permitir el flujo eléctrico, lo que permite el control automático remoto del flujo de refrigerante. El cuarto frío cuenta con dos válvulas solenoides de 2 vías de acción directa normalmente cerrada, ver figura 32. Constan de dos partes accionantes distintas pero integrales: un solenoide (bobina eléctrica) y el cuerpo de la válvula. La válvula solenoide se cierra por acción de un resorte y es abierta por el movimiento de un émbolo operado por la acción magnética de una bobina energizada eléctricamente. Las conexiones eléctricas de este elemento se encuentran en el anexo F.

**Figura 32: Válvulas solenoides del cuarto frío**



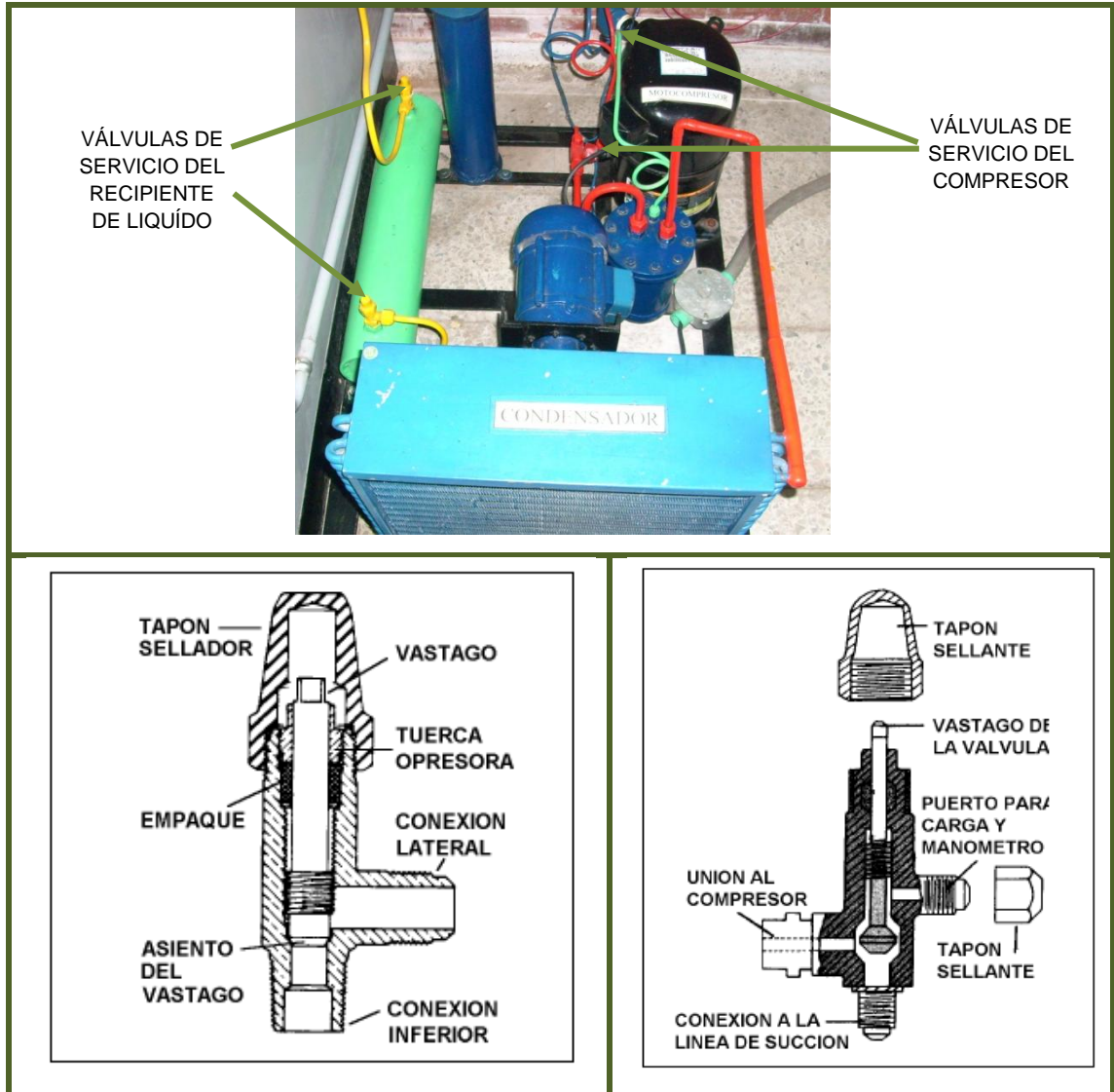
Fuente: Autores.

### 2.3.9 Válvulas de servicio

Son válvulas manuales de servicio que permiten al operador sellar partes del sistema mientras se conectan manómetros, se carga o descarga refrigerante o aceite, ó se realiza un vacío, etc.

El cuarto frío cuenta con válvulas de servicio de dos tipos (Ver figura 33): las válvulas de servicio del recipiente de líquido y las válvulas de servicio del compresor hermético. El compresor cuenta con dos válvulas de servicio una en la succión y otra en la descarga. Estas válvulas son de ángulo sencillo en el recipiente de líquido y dobles en el compresor.

**Figura 33: Válvulas de servicio del cuarto frío**



Fuente: Foto autores, imágenes Manual Técnico de Valycontrol.

## 2.4 APARATOS PRINCIPALES DE AUTOMATISMO

Estos dispositivos permiten dar funcionamiento, brindar seguridad y monitorear las diferentes variables eléctricas y térmicas que interfieren en el sistema de enfriamiento. Las conexiones de estos dispositivos se encuentran en el anexo F.

## **2.4.1 Puesta en marcha**

Son los encargados de dar la alimentación a la caja de control, encender y dar marcha a los diferentes equipos del sistema de enfriamiento.

### ***2.4.1.1 Interruptor termomagnético***









Este dispositivo se encarga de alimentar el circuito en general, interrumpiendo o dando paso de corriente eléctrica a los diferentes componentes del circuito eléctrico del cuarto de refrigeración. El interruptor se encuentra representado en la tabla 8.

### ***2.4.1.2 Interruptores de botón***

El interruptor de botón es un contacto que tiene una sola posición estable. Esta posición estable no permitirá el paso de corriente y será un interruptor normalmente abierto o interruptor de marcha. Cuando el interruptor de botón normalmente abierto es activado, el contacto se cierra, y realiza la conexión eléctrica entre sus contactos. Al retornar el interruptor a su posición estable, el circuito se abre y se corta la alimentación del elemento maniobrado. En la tabla 8 se puede observar su representación.

El tablero de control cuenta con 8 interruptores de botón que activan los diferentes componentes que tiene el cuarto frío, como se ve en la tabla 7.

**Tabla 7: Ubicación de los interruptores de botón en la caja de control del cuarto frío**

							
<b>1</b>	Motor del condensador						
<b>2</b>	Motor del evaporador						
<b>3</b>	Motor del compresor						
<b>4</b>	Válvulas solenoides 1-2						
<b>5</b>	Resistencia 1-2-3						
<b>6</b>	Alimentación del Field point						
<b>7</b>	Resistencia de descarche						
<b>8</b>	Ventilador de la caja de control						

Fuente: Autores.

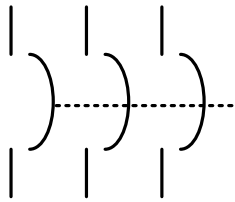

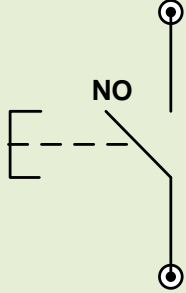

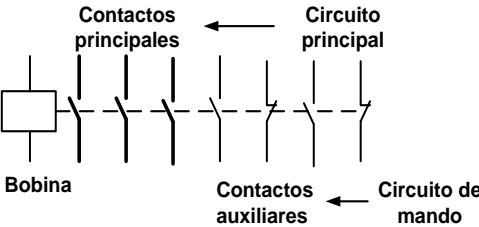

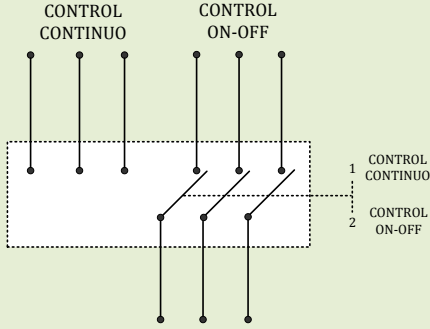

### **2.4.1.3 Contactores**

Son los encargados de establecer la corriente de alimentación de los motores eléctricos del cuarto frío al ser accionados. El cuarto cuenta con tres contactores que alimentan los motores del compresor, condensador y evaporador, esto se consigue aplicando tensión a la bobina del contactor. Cuando la bobina deja de ser excitada, sus contactos vuelven a su estado de reposo dejando de alimentar el motor al que se encuentra conectado. El contactor comunica las órdenes del circuito de mando. En la tabla 8 se muestra su símbolo.

### **2.4.1.4 Selector de control**

Este dispositivo permite dar marcha al compresor dependiendo del control que se tenga: en la posición 1 el compresor es manejado con control continuo, en la posición 2 con control ON-OFF y en la posición 0 no da marcha (Ver tabla 8).

**Tabla 8: Automatismos de puesta en marcha del cuarto frío**

AUTOMATISMOS DE PUESTA EN MARCHA		
NOMBRE	SIMBOLO ELECTRICO	FOTO
INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO		
INTERRUPTOR DE BOTÓN NORMALMENTE ABIERTO (NA Ó NO)		
CONTACTORES		
SELECTOR DE CONTROL		

Fuente: Autores.

## **2.4.2 Aparatos de protección**

Le dan protección y seguridad al sistema de enfriamiento cuando ocurre alguna anomalía durante la operación.

### **2.4.2.1 Presostatos**

El cuarto cuenta con un presostato de baja y de alta presión (Ver tabla 9) que es usado como aparato de protección. Este detiene el compresor en caso de una disminución de la presión de aspiración o de un aumento de la presión de descarga y se pone en marcha cuando las condiciones se restablecen.

El lado de baja presión (LP) del presostato se encuentra conectado con el lado de aspiración del compresor, cuando la presión disminuye en este lado el circuito se interrumpe entre los terminales A y C. Por el lado de alta presión (HP) esta conectado con la descarga del compresor, cuando la presión sube en este lado el circuito se interrumpe de igual manera como pasaba en el lado de LP. Las características técnicas se encuentran en el anexo A.

### **2.4.2.2 Relé térmico**

Este dispositivo es el encargado en el circuito eléctrico de proteger el motor del compresor si se produce una anomalía de alimentación eléctrica. Se encuentra montado en el contactor de mando del motor del compresor. Su principio de funcionamiento se basa en el calentamiento que sufren las resistencias cuando aumenta la intensidad. Está formado por un bimetálico calentado por resistencias, la deformación de las tiras bimetálicas se transmite al dispositivo de despegue de acción instantánea por medio de una varilla de mando cuando una sobrecarga resulta peligrosa para el motor del compresor. Podemos observar la representación eléctrica de este dispositivo en la tabla 9.

**Tabla 9: Automatismos de protección del cuarto frío**

APARATOS DE AUTOMATISMO DE PROTECCIÓN		
NOMBRE	SIMBOLO ELECTRICO	FOTO
PRESOSTATO		
RELÉ TÉRMICO		

Fuente: Autores.

### 2.4.3 Aparatos de control

Permiten inspeccionar el funcionamiento del cuarto frío, controlar las RPM del compresor y cambiar la carga del cuarto frío.

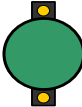
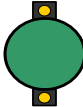
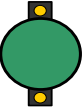
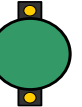
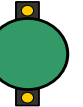
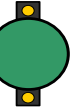
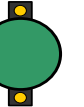

#### 2.4.3.1 Manómetros

Este elemento nos permite monitorear visualmente la presión que se este manejando tanto por el lado de alta como por el lado de baja, ya que el cuarto cuenta con dos manómetros, uno para cada lado (Ver tabla 11).

### 2.4.3.2 Visores luminosos

El tablero de control cuenta con 8 visores luminosos uno por cada interruptor y permiten ver la posición ON de los mismos al estar en color verde o la posición OFF cuando no presentan ningún color. En la tabla 10 se muestra la disposición de los visores en la caja de control.

**Tabla 10: Ubicación de los visores luminosos de la caja de control del cuarto frío**

1		2		3		4		5		6		7		8	
1	Motor del condensador														
2	Motor del evaporador														
3	Motor del compresor														
4	Válvulas solenoides 1-2														
5	Resistencia 1-2-3														
6	Alimentación del Field Point														
7	Resistencia de descarche														
8	Ventilador														

Fuente: Autores.

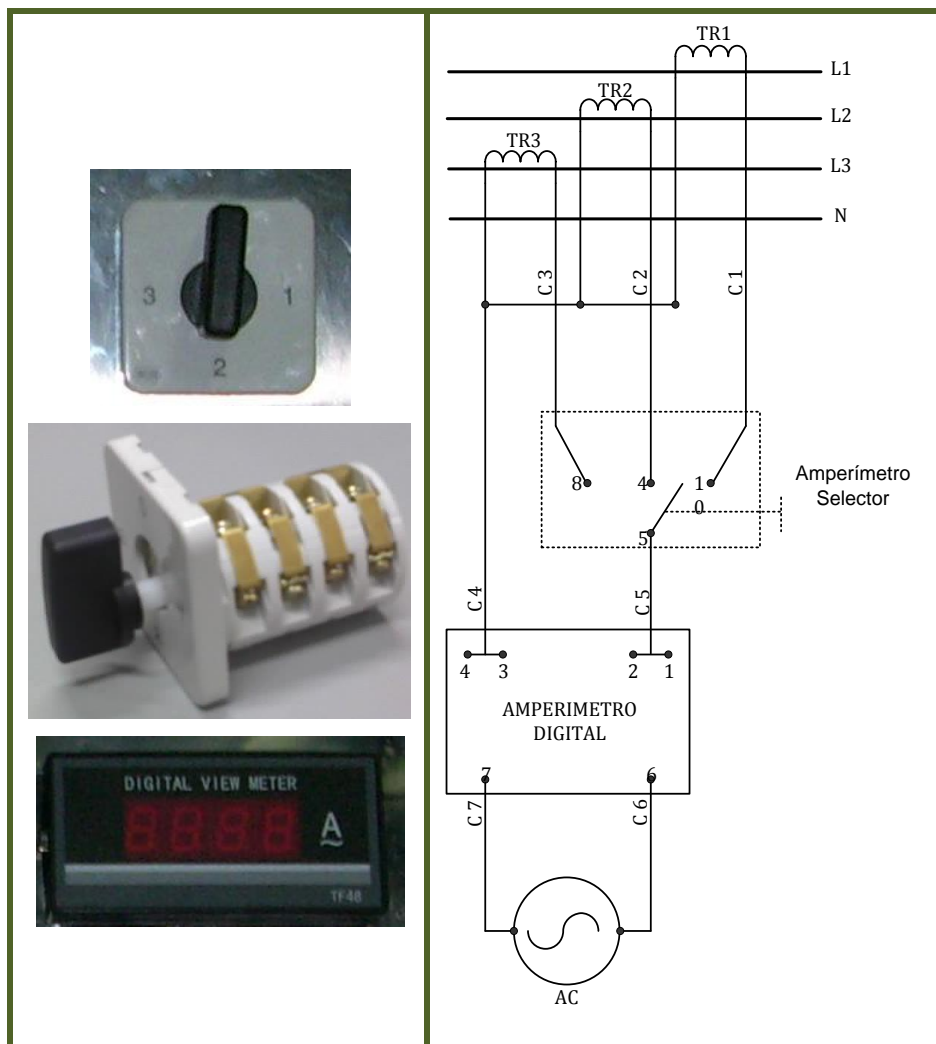
### 2.4.3.3 Transformador de intensidad pasante para cable

Este transformador se usa para medir la corriente que circula por cada una de las tres líneas de corriente alterna procedentes de la alimentación trifásica (Ver tabla 11). La caja de control cuenta con tres transformadores de intensidad pasante para cable, uno para cada línea.

### 2.4.3.4 Amperímetro

Para la medición de la intensidad que se está consumiendo en cada línea se usa un amperímetro. Este elemento cuenta con un selector (Ver figura 34) que permite seleccionar cual línea es la que se desea medir, además posee un display en la cual se puede leer el valor de los amperios que se están consumiendo.

Figura 34: Amperímetro digital del cuarto frío

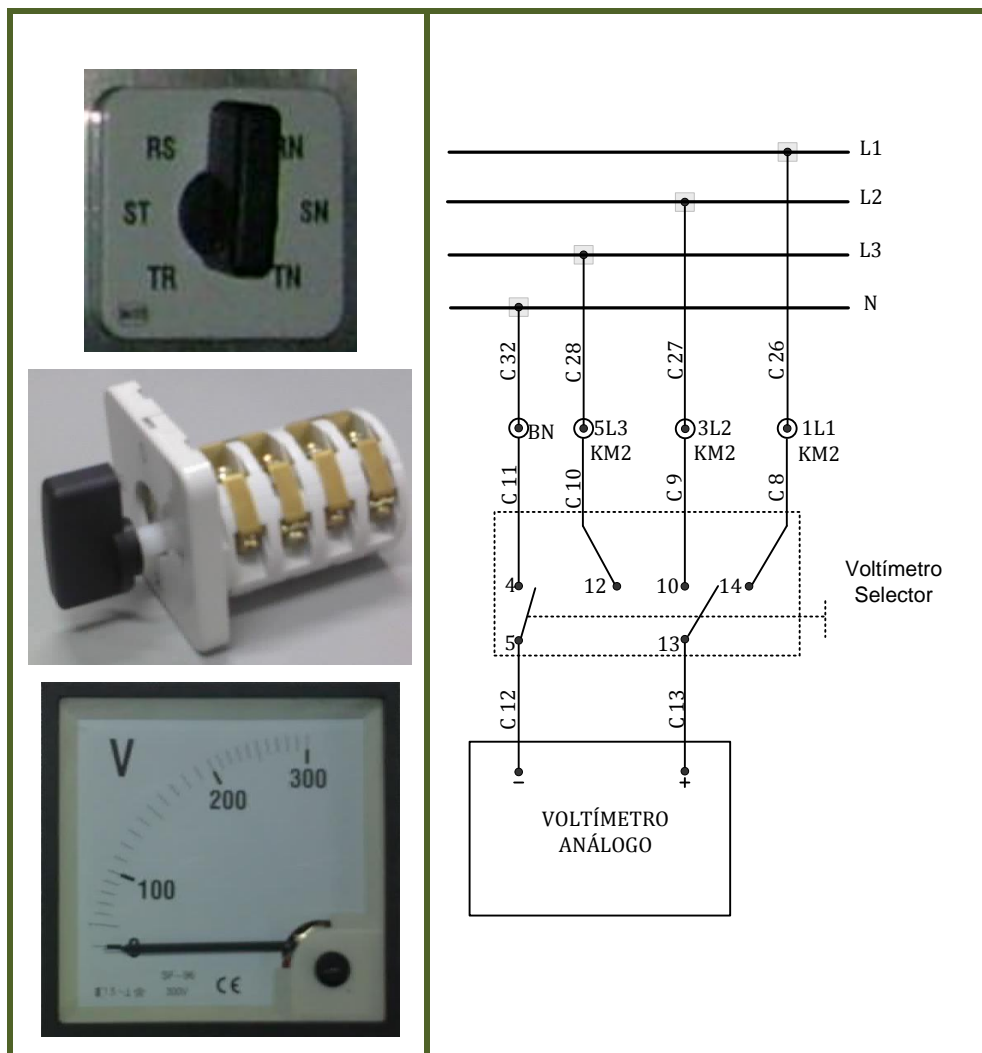


Fuente: Autores.

### 2.4.3.5 Voltímetro

Para la medición de los voltios, se usa el voltímetro. Este elemento al igual que el amperímetro posee un selector (Ver figura 35) de 7 posiciones que permite medir el voltaje de cada línea ó el voltaje entre dos líneas si así se prefiere. Cuenta con un lector análogo en el que se pueden leer los voltios consumidos.

Figura 35: Voltímetro análogo del cuarto frío

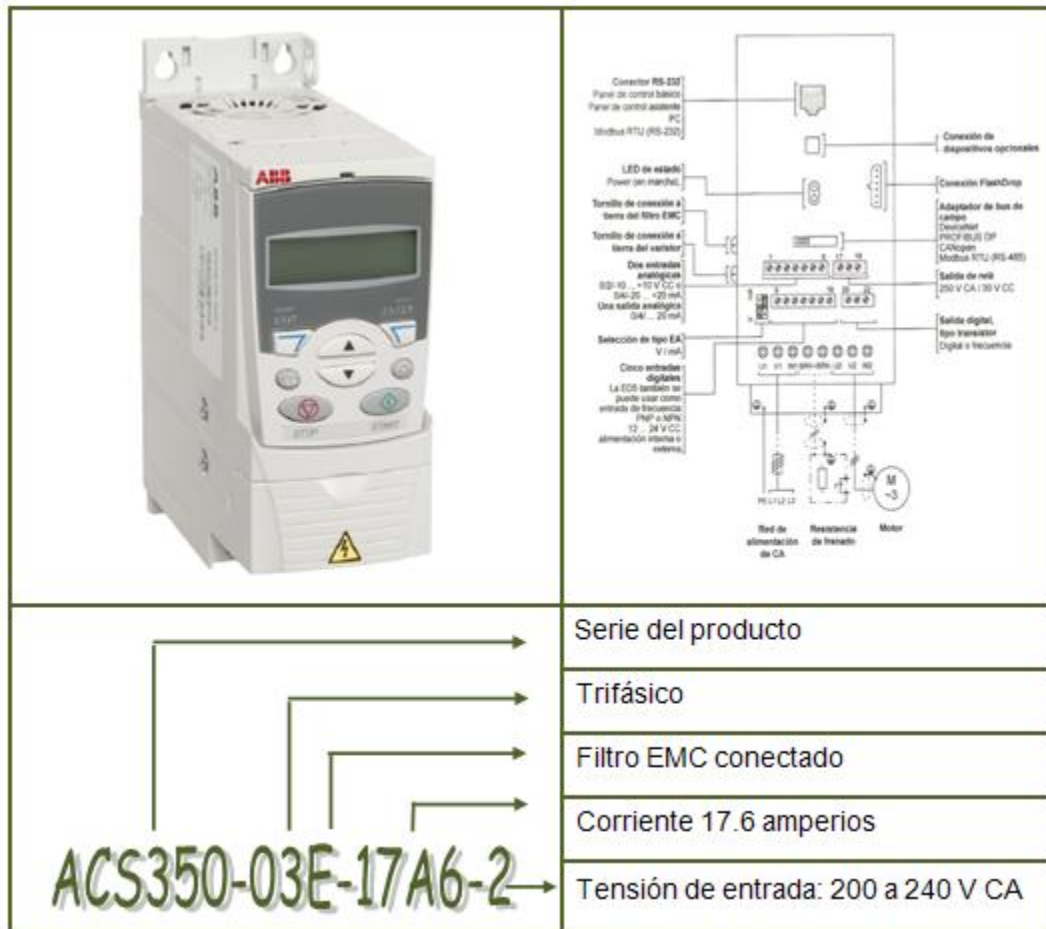


Fuente: Autores.

### 2.4.3.6 Variador de velocidad

El variador de velocidad (Ver figura 36) también llamado convertidor de frecuencia de baja tensión se utiliza para el control de velocidad del motor del compresor. Básicamente es el encargado de variar la frecuencia de acuerdo a las ordenes que le da el tipo de control que se esté usando (PID ó lógica fuzzy), para regular la capacidad de desplazamiento y posteriormente el consumo de potencia del compresor, manteniendo a la vez la temperatura de vaporación. Los principios de programación del variador de velocidad se encuentran en el Anexo C y las características generales en el Anexo A.

Figura 36: Variador de velocidad del cuarto frío

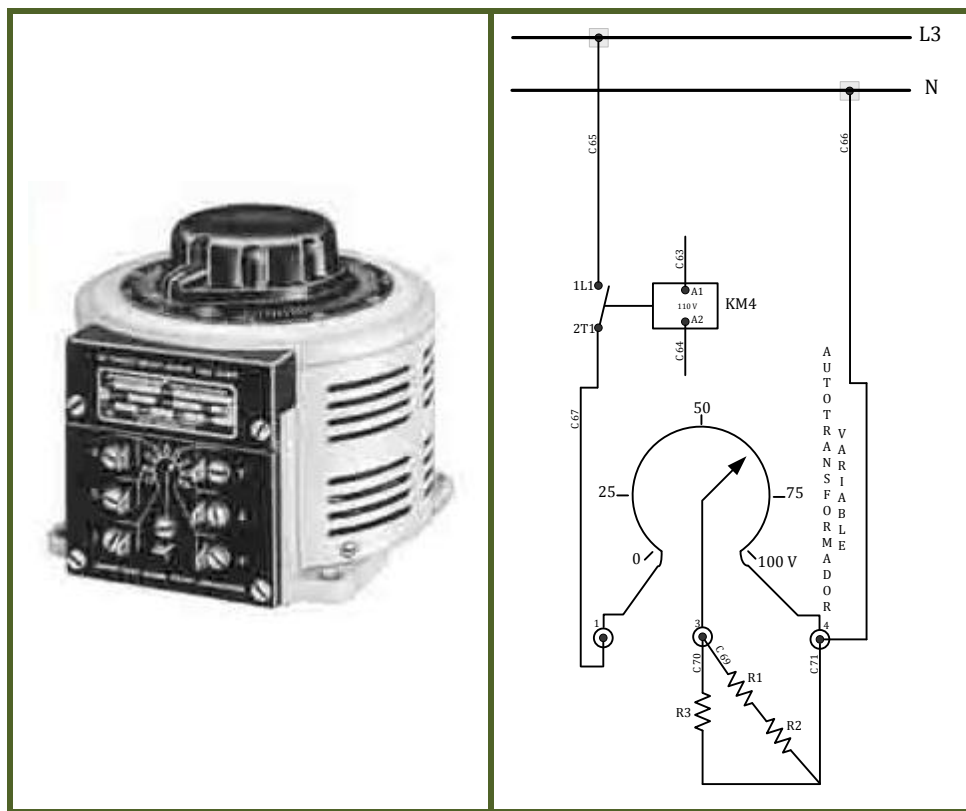


Fuente: Autores.

### 2.4.3.7 Autotransformador variable

Por medio de este aparato se controló la carga producida por las resistencias, ya que permite tener una salida variable de potencia variando el amperaje y tensión de las resistencias. Este dispositivo da la posibilidad de hacer las pruebas del sistema de refrigeración a carga parcial produciendo varios consumos de potencia por las resistencias para obtener diferentes cargas parciales.

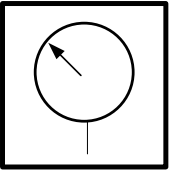

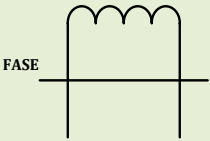

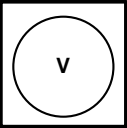

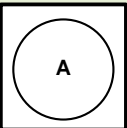

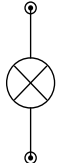

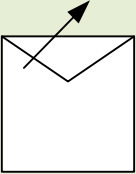

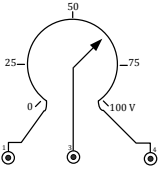

Figura 37: Autotransformador variable del cuarto frío



Fuente: Autores.

La alimentación de este autotransformador es controlado por un contactor KM4 (Ver figura 37), el cual protege la parte de marcha de las resistencias R1, R2 y R3. Las características técnicas de el autotransformador se encuentran en el Anexo A.

**Tabla 11: Automatismos de Control del cuarto frío**

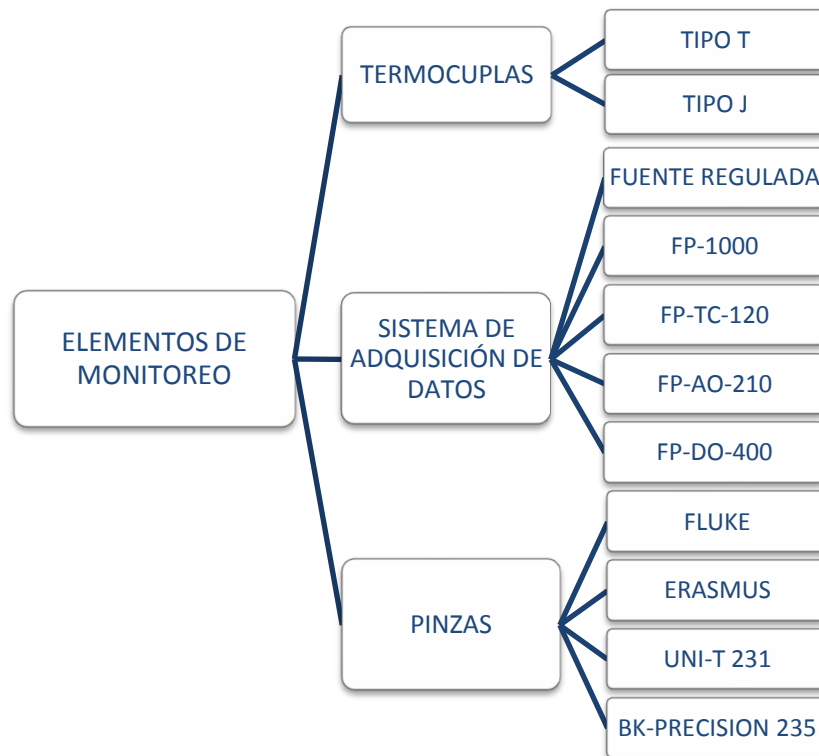
APARATOS DE AUTOMATISMO DE CONTROL		
NOMBRE	REPRESENTACIÓN	FOTO
MANOMETRO		
TRANSFORMADOR DE CABLE PASANTE		
VOLTIMETRO		
AMPERIMETRO		
VISORES LUMINOSOS		
VARIADOR DE VELOCIDAD		
AUTOTRANSFORMADOR VARIABLE		

Fuente: Autores.

## 2.5 ELEMENTOS USADOS PARA EL MONITOREO DE LAS VARIABLES DEL CUARTO FRÍO

Permiten el monitoreo de las diferentes variables del cuarto frío como son la temperatura, la corriente, potencia, factor de potencia y a la vez dan el encendido, apagado o el cambio de RPM del compresor mediante señales digitales o análogas respectivamente, estos elementos se encuentran en la figura 38.

**Figura 38: Cuadro sinóptico de los elementos de monitoreo del cuarto frío**



Fuente: Autores.

### 2.5.1 Termocuplas

El cuarto frío cuenta con 7 termocuplas que monitorean las temperaturas de interés y se encuentran montadas como se muestra en el anexo E. En la tabla 12 se pueden ver las características de cada una de ellas.

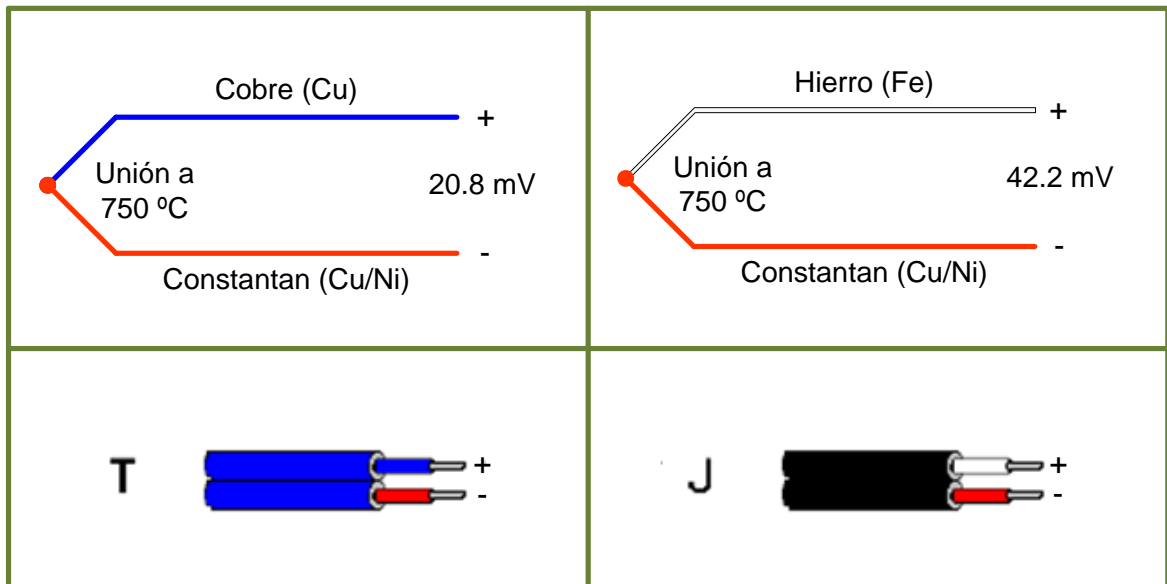
**Tabla 12: Tipo de termocuplas del cuarto frío**

TEMPERATURA	CANAL	TIPO	MATERIALES		RANGO °C
			POS (+)	NEG (-)	
Ambiente	0	J	Hierro	Constantán	-180,750
Entrada del compresor	1	T	Cobre	Constantán	-250,400
Salida del compresor	2	T	Cobre	Constantán	-250,400
Entrada de VET	3	T	Cobre	Constantán	-250,400
Entrada del evaporador	4	T	Cobre	Constantán	-250,400
Salida del evaporador	5	T	Cobre	Constantán	-250,400
Cuarto frío	6	T	Cobre	Constantán	-250,400

Fuente: Autores.

Como se observa en la anterior tabla el cuarto solo tiene termocuplas tipo J y tipo T, en la figura 39 se puede observar los colores que las representan.

**Figura 39: Termocuplas tipo T y J**



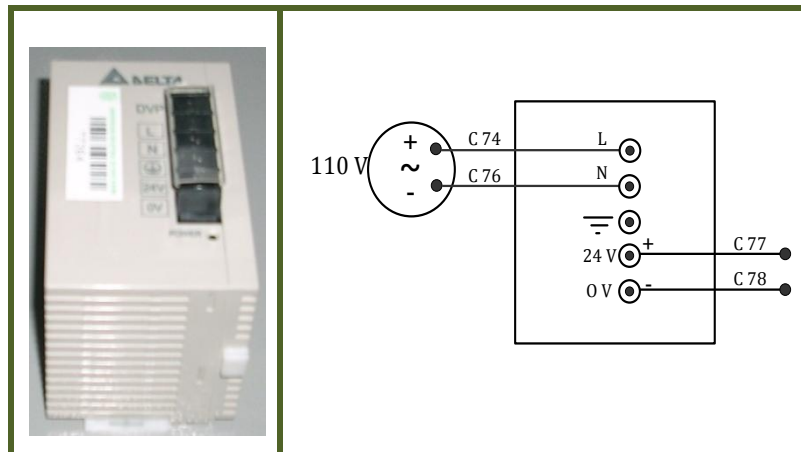
Fuente: Autores.

## 2.5.2 Sistema de adquisición de datos

### 2.5.2.1 Fuente regulada

Este dispositivo (Ver figura 40) es el encargado de mantener una alimentación constante de 24 voltios a los módulos Field Point, lo que evita que la alimentación de los mismos este oscilando y se produzcan mediciones erróneas debido a la perturbación del voltaje. Las características de este elemento se encuentran en el anexo A.

**Figura 40: Fuente regulada del cuarto frío**

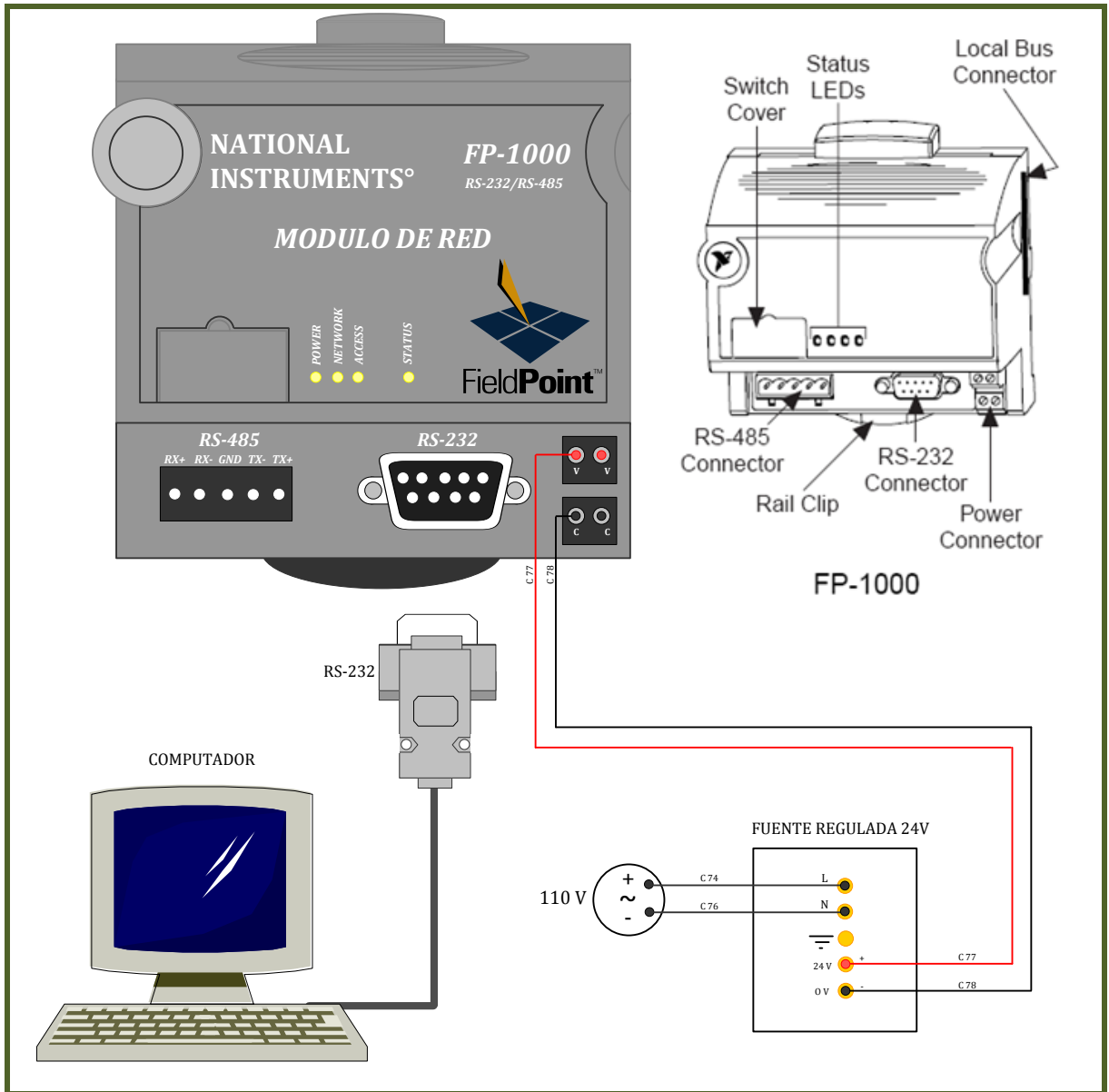


Fuente: Autores.

### 2.5.2.2 Modulo FP-1000

El modulo FP-1000 (Ver figura 41) es el encargado de alimentar los demás módulos y de transmitir los datos de las mediciones que realizan los sensores al PC por medio del puerto RS-232. Las conexiones de este modulo se encuentran en el anexo F.

**Figura 41: Modulo FP-1000**



Fuente: Imagen izquierda autores, imagen derecha National Instruments.

### 2.5.2.3 Modulo FP-TC-120

El modulo FP-TC-120 (Ver figura 42) permite medir las temperaturas por medio de termocuplas, contiene 7 canales que nos permiten medir 8 temperaturas. Las conexiones de este modulo se presentan en el anexo F.

Algunas de sus características son:

- Maneja 8 tipos de termocuplas: J, K, R, S, T, N, E y B.
- Maneja 4 rangos de voltajes:  $\pm 25$ ,  $\pm 50$ ,  $100 \pm$  y  $-20$  a  $80$  mV.
- Cuando alguna termocupla no está funcionando el LED del canal se coloca de color rojo.

**Figura 42: Modulo FP-TC-120**

Canal	Número de terminal		
	IN (+)	IN (-)	T
0	1	2	T1
1	3	4	T2
2	5	6	T3
3	7	8	T4
4	9	10	T5
5	11	12	T6
6	13	14	T7
7	15	16	---

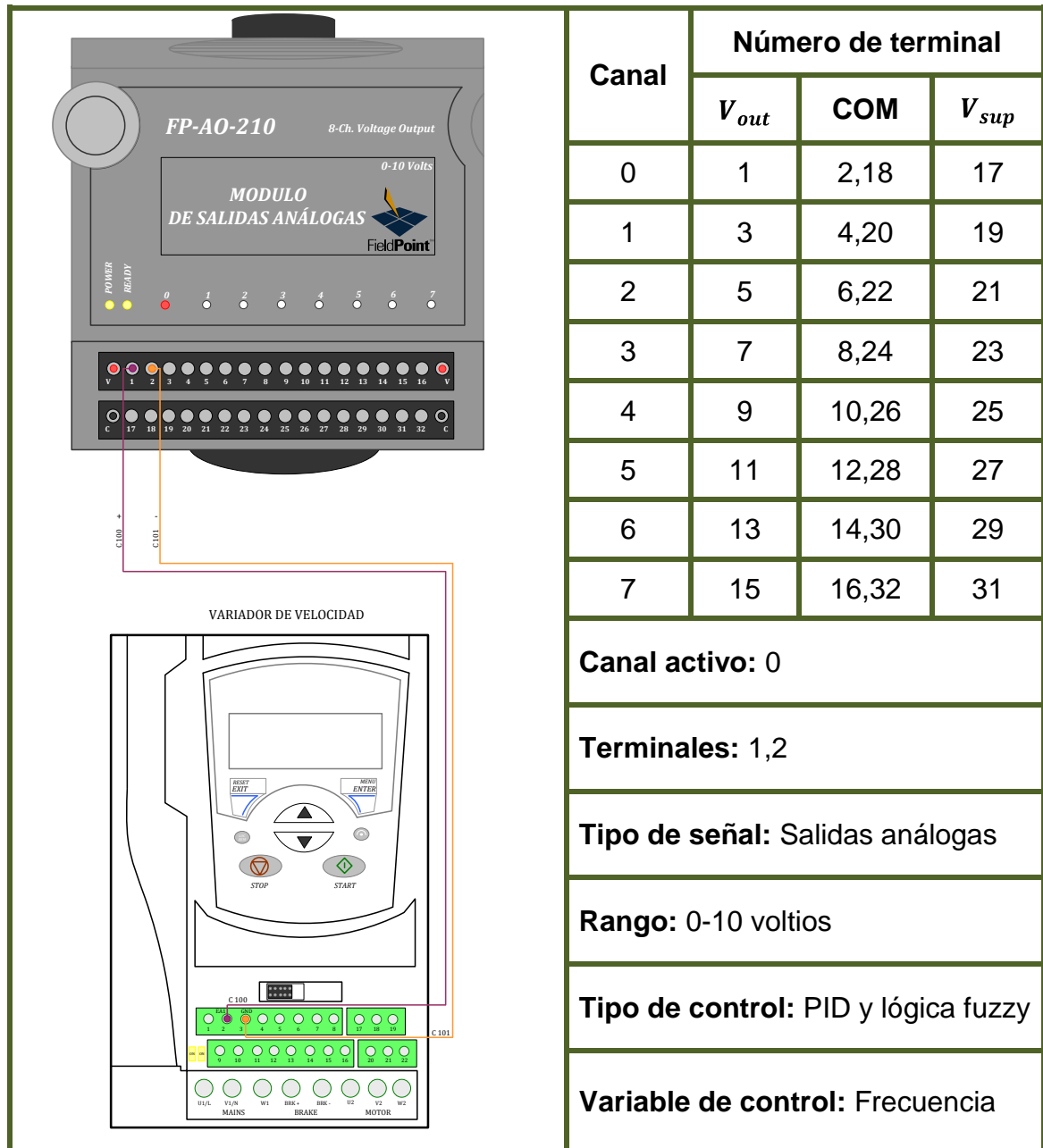
**T1:** Medio ambiente.  
**T2:** Entrada compresor.  
**T3:** Salida compresor.  
**T4:** VET.  
**T5:** Entrada evaporador.  
**T6:** Salida evaporador.  
**T7:** Cuarto frío.

Fuente: Autores.

### 2.5.2.4 Modulo FP-AO-210

El modulo FA-AO-210 es de salidas análogas de voltaje, se usa para enviar señales al variador, ya sea en el control continuo con PID o con Lógica Fuzzy.

Figura 43: Modulo FP-AO-210



Fuente: Autores.

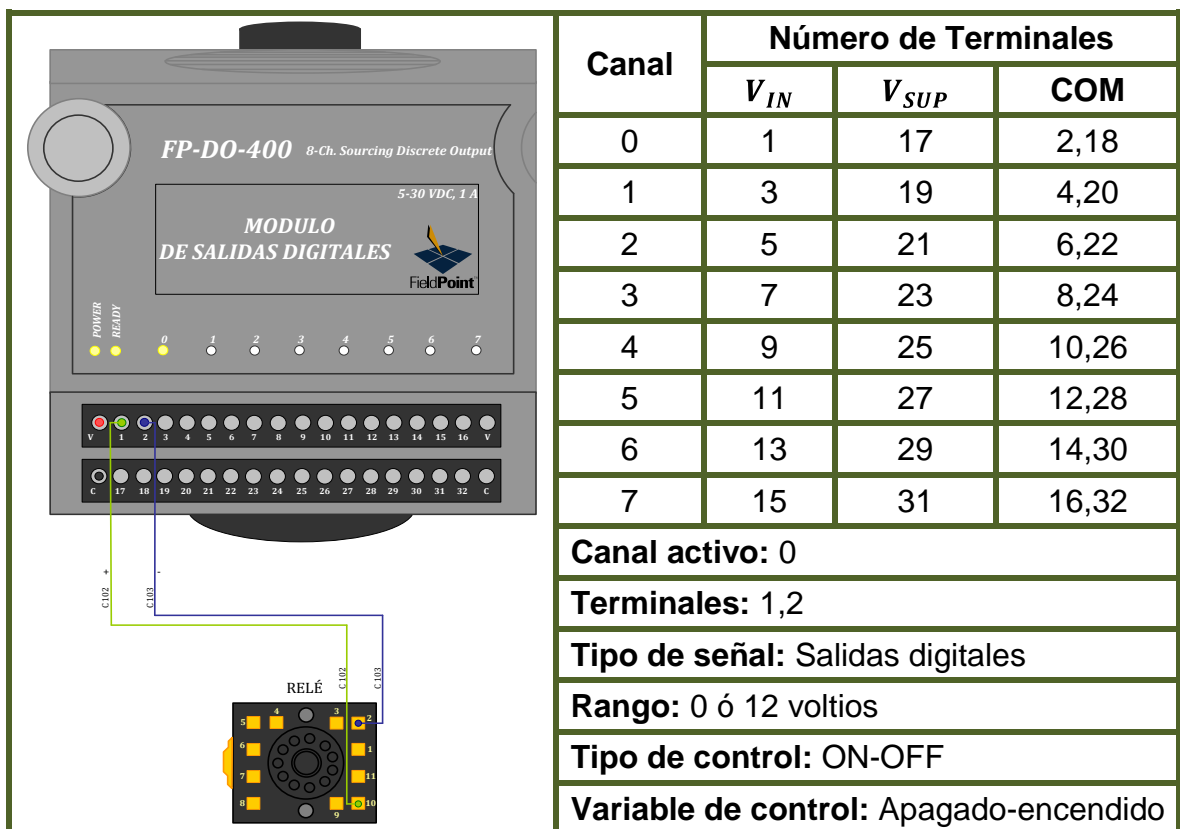
A continuación se dan algunas de sus características más importantes:

- Maneja un rango de salida de 0-10 V
- Una corriente de 1-10 mA por cada canal.
- Rango de operación de -40 a 70 °C; resolución de 12 bits
- Tiene 8 canales y la asignación de canales se muestra en la figura 43.

### 2.5.2.5 Modulo FP-DO-400

El modulo FP-DO-400 es de salidas digitales, usado para apagar o prender el compresor en el control ON-OFF enviando una señal de voltaje de 0 o 12V respectivamente.

**Figura 44: Modulo FP-DO-400**



Fuente: Autores.

Algunas de sus características más importantes son:

- Tiene 8 canales de salidas digitales. La asignación de canales se muestra en la figura 44 y las conexiones de este modulo en el anexo F.
- Salida de voltaje entre 5-30 VDC.
- Proporcionan una salida de 1.5 A por canal

### **2.5.3 Pinzas**

Estos elementos son usados para determinar el consumo de potencia de cada tipo de control: ON-OFF y continuo. Por medio de estas pinzas se puede medir las tres potencias (activa, reactiva y aparente), el factor de potencia, corriente, voltaje de cada línea conectada al compresor y el amperaje consumido por las resistencias que simulan la carga en el cuarto frío.

#### **2.5.3.1 Pinza Fluke**

Esta pinza (Ver figura 45) se usó para medir el amperaje que consumen las resistencias del cuarto frío. Algunas de las características más importantes de este elemento se mencionan a continuación:

- Mide hasta 1000 amperios ac y dc (true-rms), es decir mide el amperaje real consumido por la carga sin importar la forma de onda del voltaje, sea senoidal, cuadrada o triangular, esto es importante cuando se miden motores conectados a variadores de frecuencia u otros equipos donde otras pinzas dan valores erróneos.
- Voltaje ac/dc hasta 600 volt.
- Resistencia / continuidad.
- Frecuencia en hertz de la corriente medida.

### 2.5.3.2 Pinzas para medir potencia

Para la medición de la potencia del compresor se usaron tres pinzas una por cada línea: Pinza Erasmus, pinza UNI-T 231 y pinza BK-PRECISION 325 (Ver figura 45). Estas pinzas permiten medir los mismos parámetros que la pinza Fluke más el factor de potencia, la potencia activa, pasiva y reactiva, con un amplio rango de frecuencia lo que permite la contemplación de los armónicos. Algunas de las características de estas pinzas se listan a continuación:

- Valores en rms
- Corriente continua: 40A, 100A, 400A, 600A.
- Rango de potencia activa: 40Kw, 400Kw.
- Voltaje continuo: 15V, 100V, 300V, 400V, 600V.

**Figura 45: Pinzas para medición de variables eléctricas**



Fuente: Autores.

### 3 ESCENARIOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL CUARTO FRÍO

El estudio energético realizado en el cuarto frío del laboratorio de refrigeración involucro cuatro escenarios específicos, los cuales se encuentran en la figura 46 y se explican detalladamente en este capítulo.

**Figura 46: Escenarios de investigación para la determinación del consumo energético del cuarto frío**



Fuente: Autores.

#### 3.1 TEMPERATURA DE REFERENCIA

Para el estudio se usaran dos temperaturas como referencia, el primer caso es para una temperatura de vaporación de 0 °C y el segundo caso para una temperatura de -5°C. Estas temperaturas se escogieron pues en la realidad corresponden a las temperaturas de conservación de varios productos alimenticios como se puede observar en la tabla13, que es uno de los grandes campos donde estos sistemas son usados.

**Tabla 13: Uso de las temperaturas de vaporación escogidas**

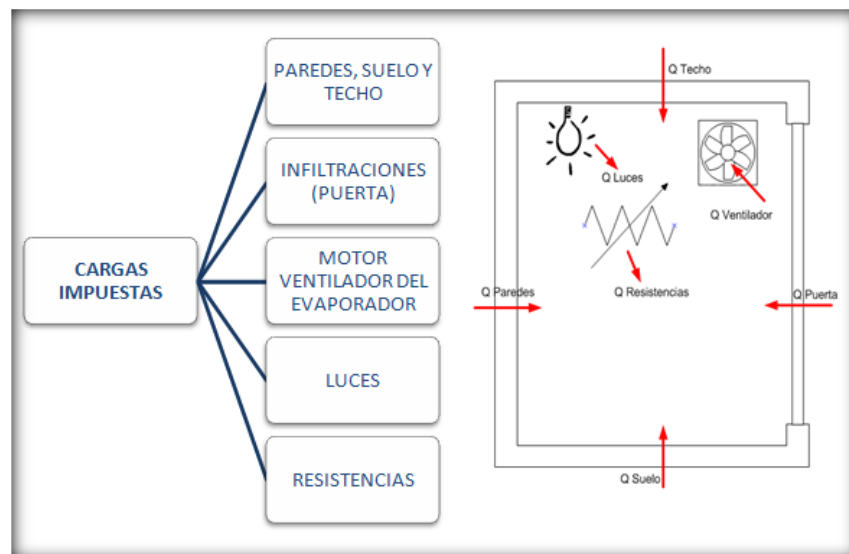
TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN	TEMPERATURA DEL CUARTO	PRODUCTO
0 °C	8 °C	Picadillo de carne, dátiles, frescos, lechugas, coles, alcachofas, ensaladas, etc.
-5 °C	0°C	Productos de mar, fresas, melocotones, queso, ciruelas, etc.

Fuente: Formulario del frío.

### 3.2 DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS IMPUESTAS

En este escenario se trabajara con cargas parciales del 20% y 60% de la capacidad nominal para cada temperatura de vaporación escogida. En la figura 47 se muestran las cargas térmicas que deben ser evacuadas del cuarto frío, las cuales permiten determinar la capacidad nominal (100%) para las temperaturas de vaporación dadas.

**Figura 47: Componentes de la carga impuesta**



Fuente: Autores.

La carga total que el compresor debe ser capaz de compensar será igual a la suma de todas las cargas impuestas, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_T = Q_P + Q_{INF} + Q_M + Q_L + Q_R \text{ [Kw]} \quad (3.1)$$

$$Q_P = Q_{P1} + Q_{P2} + Q_{P3} \text{ [Kw]} \quad (3.2)$$

Donde:

$Q_T$ : Carga total, [Kw].

$Q_P$ : Carga por paredes, suelo y techo, [Kw].

$Q_{P1}$ : Carga por paredes, [Kw].

$Q_{P2}$ : Carga por suelo, [Kw].

$Q_{P3}$ : Carga por techo, [Kw].

$Q_{INF}$ : Carga por infiltraciones, [Kw].

$Q_M$ : Carga debida al motor del ventilador del evaporador, [Kw].

$Q_L$ : Carga por luces, [Kw].

$Q_R$ : Carga por resistencias, [Kw].

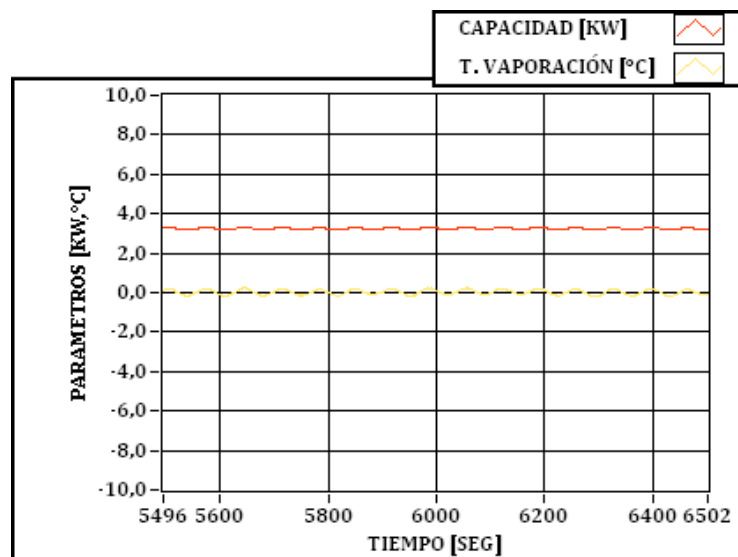
La capacidad nominal (capacidad del compresor a su máxima velocidad para una temperatura de vaporación determinada) se encuentra tabulada por el fabricante (Ver anexo B) para determinadas condiciones, las cuales no coinciden con el sistema en estudio, por lo que se tiene que determinar esta capacidad experimentalmente para luego hallar las cargas parciales del 20% y 60% de la capacidad nominal. Para la determinación de todo lo anterior se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se prendió el compresor a sus máximas RPM (1750).
2. Se colocaron unas cargas iniciales al sistema.
3. Se espero que la capacidad y la temperatura de vaporación permanecieran constante en el tiempo.

4. Se comparo el valor de la temperatura de vaporación obtenida en el ítem anterior con las temperaturas de referencia escogidas para este estudio (0°C y -5°C). Si el valor estaba por encima de la referencia se le quitaba carga al sistema por medio del autotransformador variable y si ocurría lo contrario se le adicionaba carga.
5. Determinados los valores de la carga nominal en la que se daba la estabilización de la temperatura de vaporación se procedió a calcular las cargas teóricas mencionadas en la figura 45.
6. Con los valores de las cargas halladas en el paso 5, se sumaron para determinar la carga total (100%) y a este valor sacarle el 20% y 60%, para manejar los dos escenarios mencionados.
7. Cuadrados los valores del 20% y 60% de la carga por medio del autotransformador variable, se procedió a realizar las pruebas pertinentes.

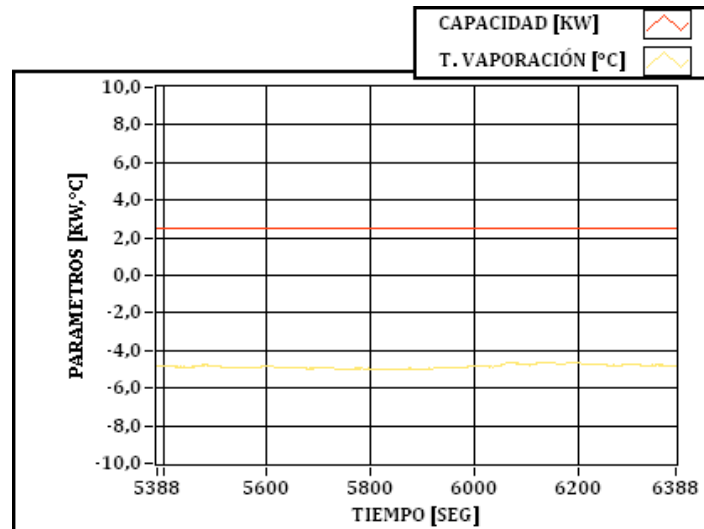
En la figura 48 y 49 se muestran los resultados de la carga y temperatura de vaporación estabilizada en el tiempo para 0°C y -5°C.

**Figura 48: Determinación de la carga nominal del cuarto frío a 0 °C**



Fuente: LabVIEW.

**Figura 49: Determinación de la carga nominal del cuarto frío a 0 °C**



Fuente: LabVIEW.

### 3.2.1 Cálculo de cargas al 100%

A continuación se muestra el cálculo de las cargas impuestas al sistema.

#### 3.2.1.1 Cálculo de la carga por paredes, suelo y techo

Para cada una de las paredes, suelo y techo que componen la cámara de enfriamiento, la cantidad de calor que penetra está dada por la fórmula:

$$Q_p = KA \frac{(T_a - T_{ce})}{\Delta e} [Kw] \quad (3.3)$$

Donde:

$Q_p$ : Carga por paredes, suelo y techo de la cámara de enfriamiento, [Kw].

$K$ : Conductividad térmica del aislamiento de la cámara de enfriamiento.

$A$ : Área de transferencia de calor, [m<sup>2</sup>].

$T_a$ : Temperatura del ambiente, [°C].

$T_{ce}$ : Temperatura del cuarto de enfriamiento, [°C].

$\Delta e$ : Espesor del aislamiento, [m].

En la tabla 14 se encuentran los datos de los cálculos de la carga que se introduce por las paredes, por el suelo y el techo de la cámara de enfriamiento cuando el compresor trabaja a 1750 RPM (100% de la capacidad).

**Tabla 14: Cálculo de la carga por paredes en el cuarto frío**

<b>CASO 1: <math>T_{eva} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}</math></b>			
<b>SUPERFICIE</b>	<b>AREA [m<sup>2</sup>]</b>	<b>CONSTANTES</b>	<b>CARGA [Kw]</b>
Paredes: derecha e izquierda.	$A_1 = 2 \times h \times l$ $A_1 = 4.8970$	$T_a = 21.70^{\circ}\text{C}$ $K = 0.025\text{W/m} - K$	$Q_{P1} = KA_1 \frac{(T_a - T_{ce})}{\Delta e}$ $Q_{P1} = 0.0156$
Pared: frontal y posterior	$A_2 = 2 \times a \times h$ $A_2 = 8.7564$	$\Delta e = 0.1016\text{ m}$ $T_{ce} = 8.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ $h = 2.075\text{ m}$	$Q_{P2} = KA_2 \frac{(T_a - T_{ce})}{\Delta e}$ $Q_{P2} = 0.0279$
Techo-suelo	$A_3 = 2 \times a \times l$ $A_3 = 4.9796$	$l = 1.180\text{ m}$ $a = 2.110\text{ m}$	$Q_{P3} = KA_3 \frac{(T_a - T_{ce})}{\Delta e}$ $Q_{P3} = 0.0158$
<b>CARGA TOTAL</b>		$Q_P = Q_{P1} + Q_{P2} + Q_{P3}$ <b><math>Q_P = 0.0593</math></b>	
<b>CASO 2: <math>T_{eva} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}</math></b>			
<b>SUPERFICIE</b>	<b>AREA [m<sup>2</sup>]</b>	<b>CONSTANTES</b>	<b>CARGA [Kw]</b>
Paredes: derecha e izquierda.	$A_1 = 2 \times h \times l$ $A_1 = 4.8970$	$T_a = 19,49^{\circ}\text{C}$ $K = 0.025\text{W/m} - K$	$Q_{P1} = KA_1 \frac{(T_a - T_{ce})}{\Delta e}$ $Q_{P1} = 0.0195$
Pared: frontal y posterior	$A_2 = 2 \times a \times h$ $A_2 = 8.7564$	$\Delta e = 0.1016\text{ m}$ $T_{ce} = 3,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ $h = 2.075\text{ m}$	$Q_{P2} = KA_2 \frac{(T_a - T_{ce})}{\Delta e}$ $Q_{P2} = 0.0349$
Techo-suelo	$A_3 = 2 \times a \times l$ $A_3 = 4.9796$	$l = 1.180\text{ m}$ $a = 2.110\text{ m}$	$Q_{P3} = KA_3 \frac{(T_a - T_{ce})}{\Delta e}$ $Q_{P3} = 0.0198$
<b>CARGA TOTAL</b>		$Q_P = Q_{P1} + Q_{P2} + Q_{P3}$ <b><math>Q_P = 0.0742</math></b>	

Fuente: Autores.

### 3.2.1.2 Cálculo de carga por infiltraciones (aire que entra por la apertura de la puerta)

Este calor es muy difícil de calcular con exactitud varios textos tienen valores que son producto de experimentos y que proporcionan resultados aceptables. Para calcular esta carga se empleó la ecuación del libro instalaciones frigoríficas, que dice:

$$Q_{INF} = KC_{pi}A\sqrt{H} \sqrt{1 - \frac{C_{pe}}{C_{pi}}(h_e - h_i)} \quad [Kw] \quad (3.4)$$

$$K = 0.48 + 0.004(T_e - T_i) \quad (3.5)$$

Donde:

$Q_{INF}$ : Carga producida por las infiltraciones de aire, [Kw]

$K$ : Factor de corrección.

$T_e$ : Temperatura del aire exterior, [°C].

$T_i$ : Temperatura del aire interior, [°C]

$A$ : Área de la puerta, [m<sup>2</sup>].

$H$ : Altura de la puerta, [m].

$C_{pi}$ : Calor específico del aire interior, [Kj/Kg-°C].

$C_{pe}$ : Calor específico del aire exterior, [Kj/Kg-°C].

$h_e$ : Entalpía del aire exterior, [Kj/Kg].

$h_i$ : Entalpía del aire interior, [Kj/Kg].

En la tabla 15 se encuentra el cálculo de esta carga para las dos temperaturas de vaporación escogidas.

**Tabla 15: Calculo de la carga debido a la apertura de puertas**

<b>CASO 1: <math>T_{eva} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}</math></b>			
<b>Constantes</b>	<b>Aire interior</b>	<b>Aire exterior</b>	<b>CARGA [Kw]</b>
$H = 1.69\text{ m}$ $a = 0.69\text{ m}$	$T_i = 8.75\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_e = 21.70\text{ }^{\circ}\text{C}$	$K = 0.48 + 0.004(T_e - T_i)$ $K = 0.5318$ $Q_{INF} = K C_{pi} A \sqrt{H} \sqrt{1 - \frac{C_{pi}}{C_{pe}} (h_e - h_i)}$ $Q_{INF} = 0.332$
$A = H \times a$ $A = 1.16\text{ m}^2$	$C_{pi} = 1.006 \frac{KJ}{Kg - K}$	$C_{pe} = 1.007 \frac{KJ}{Kg - K}$	
$\sqrt{H} = 1.3$	$h_i = 282.2 \frac{KJ}{Kg}$	$h_e = 295.2 \frac{KJ}{Kg}$	
<b>CASO 2: <math>T_{eva} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}</math></b>			
<b>Constantes</b>	<b>Aire interior</b>	<b>Aire exterior</b>	<b>CARGA [Kw]</b>
$H = 1.69\text{ m}$ $a = 0.69\text{ m}$	$T_i = 3.307\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_e = 19.49\text{ }^{\circ}\text{C}$	$K = 0.48 + 0.004(T_e - T_i)$ $K = 0.5447$ $Q_{INF} = K C_{pi} A \sqrt{H} \sqrt{1 - \frac{C_{pi}}{C_{pe}} (h_e - h_i)}$ $Q_{INF} = 0.426$
$A = H \times a$ $A = 1.16\text{ m}^2$	$C_{pi} = 1.006 \frac{KJ}{Kg - K}$	$C_{pe} = 1.007 \frac{KJ}{Kg - K}$	
$\sqrt{H} = 1.3$	$h_i = 276.7 \frac{KJ}{Kg}$	$h_e = 293 \frac{KJ}{Kg}$	

Fuente: Autores.

### 3.2.1.3 Cálculo de carga debido al motor del ventilador del evaporador

La carga inductiva bifásica producida por el motor del ventilador del evaporador es igual a la potencia en uso. Entonces se tiene:

$$Q_M = 2 \times V \times I \times \cos \phi \quad [Kw] \quad (3.6)$$

$$Q_M = 2 \times 128.5 \times 0.8 \times 0.999$$

$$Q_M = 0.203Kw$$

### **3.2.1.4 Cálculo de la carga producida por las luces**

Esta carga se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_L = V \times I \text{ [Kw]} \text{ (3.7)}$$

$$Q_L = 120 \times 1$$

$$Q_L = 0.12 \text{ Kw}$$

### **3.2.1.5 Cálculo de la carga producida por las resistencias**

La carga producida por las resistencias es la suma de la potencia de las resistencias fijas en uso más la potencia consumida por las resistencias variables, valor medido en el autotransformador variable. Para el cálculo de esta carga se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_R = Q_{RF} + Q_{RV} \text{ [Kw]}$$

$$Q_R = n \times V_{RF} \times I_{RF} + V_{RV} \times I_{RV} \text{ [Kw]} \text{ (3.8)}$$

Donde:

$Q_R$ : Carga producida por las resistencias, [Kw]

$n$ : Número de resistencias fijas en uso.

$V_{RF}$ : Voltaje de la línea de la resistencia fija, [Volt].

$I_{RF}$ : Corriente de la línea de la resistencia fija, [Amp].

$V_{RV}$ : Voltaje de la línea de la resistencia variable, [Volt].

$I_{RV}$ : Corriente de la línea de la resistencia variable, [Amp].

El sistema cuenta con cinco resistencias dos de ellas son fijas y las otras tres se encuentran conectadas al autotransformador variable. En la tabla 17 se muestran los cálculos de estas cargas.

**Tabla 16: Calculo de la carga debido a las resistencias**

<b>CASO 1: <math>T_{eva} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}</math></b>			
<b>CONDICIONES</b>	<b>RESISTENCIAS FIJAS</b>	<b>RESISTENCIAS VARIABLES</b>	<b>CARGA [Kw]</b>
<b>Voltaje</b>	120	98	$Q_R = Q_{RF} + Q_{RV}$ $Q_R = 2.1074\text{ Kw}$
<b>Corriente</b>	8.33	11.3	
<b>Resistencias en uso</b>	1	3	
<b>Potencia</b>	$Q_{RF} = n \times V_{RF} \times I_{RF}$ $Q_{RF} = 1\text{ Kw}$	$Q_{RV} = V_{RV} \times I_{RV}$ $Q_{RV} = 1.1074\text{ Kw}$	
<b>CASO 2: <math>T_{eva} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}</math></b>			
<b>CONDICIONES</b>	<b>RESISTENCIAS FIJAS</b>	<b>RESISTENCIAS VARIABLES</b>	<b>CALOR TOTAL</b>
<b>Voltaje</b>	-----	120	$Q_R = Q_{RF} + Q_{RV}$ $Q_R = 1.596\text{ Kw}$
<b>Corriente</b>	-----	13.3	
<b>Resistencias en uso</b>	0	3	
<b>Potencia</b>	-----	$Q_{RV} = V_{RV} \times I_{RV}$ $Q_{RV} = 1.596\text{ Kw}$	

Fuente: Autores.

### 3.2.2 Determinación de las cargas parciales a las temperaturas de vaporación de estudio

Conocidas las cargas impuestas (paredes, motor, luces y resistencia) al sistema de refrigeración, se procede a calcular la carga total a la capacidad nominal para las temperaturas de vaporación dadas. Los valores de estas cargas se encuentran en la tabla 17.

**Tabla 17: Carga total a la capacidad nominal de las temperaturas de vaporación en estudio**

CARGA AL 100%	TEMPERATURA DE VAPORACIÓN	
	$T_{ev} = 0^{\circ}\text{C}$	$T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$
<b>Paredes</b>	$Q_P = 0.0593 \text{ Kw}$	$Q_P = 0.0742 \text{ Kw}$
<b>Motor</b>	$Q_M = 0.203 \text{ Kw}$	$Q_M = 0.203 \text{ Kw}$
<b>Luces</b>	$Q_L = 0.12 \text{ Kw}$	$Q_L = 0.12 \text{ Kw}$
<b>Resistencias</b>	$Q_R = 2.1074 \text{ Kw}$	$Q_R = 1.596 \text{ Kw}$
<b>CARGA TOTAL</b> $Q_T = Q_P + Q_M + Q_L + Q_R$	$Q_T = 2.4897 \text{ Kw}$	$Q_T = 1.9932 \text{ Kw}$

Fuente: Autores.

A las cargas totales encontradas en la anterior tabla se les saca el 20% y 60%, para encontrar finalmente las cargas parciales con las que se realizaran las pruebas y las cuales se encuentran en las tablas 18 y 19 respectivamente.

**Tabla 18: Cargas parciales al 20%**

CARGA AL 20%	TEMPERATURA DE VAPORACIÓN	
	$T_{ev} = 0^{\circ}\text{C}$	$T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$
<b>CARGA TOTAL</b> $Q_{T(20\%)} = 0.2 Q_T$	$Q_{T(20\%)} = 0.4979 \text{ Kw}$	$Q_{T(20\%)} = 0.3986 \text{ Kw}$
<b>Paredes</b>	$Q_P = 0.0593 \text{ Kw}$	$Q_P = 0.0742 \text{ Kw}$
<b>Motor</b>	$Q_M = 0.203 \text{ Kw}$	$Q_M = 0.203 \text{ Kw}$
<b>Luces</b>	$Q_L = 0.12 \text{ Kw}$	$Q_L = 0.12 \text{ Kw}$
<b>Cargas fijas</b> $Q_{CF} = Q_P + Q_M + Q_L$	$Q_{CF} = 0.3823 \text{ Kw}$	$Q_{CF} = 0.3972 \text{ Kw}$
<b>Resistencias</b> $Q_{R(20\%)} = Q_{T(20\%)} - Q_{CF}$	$Q_R = 0.1156 \text{ Kw}$	$Q_R = 0.0014 \text{ Kw}$

Fuente: Autores.

**Tabla 19: Cargas parciales al 60%**

CARGA AL 60%	TEMPERATURA DE VAPORACIÓN	
	$T_{ev} = 0^{\circ}\text{C}$	$T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$
<b>CARGA TOTAL</b> $Q_{T(60\%)} = 0.6Q_T$	$Q_{T(60\%)} = 1.4938 \text{ Kw}$	$Q_{T(60\%)} = 1.1959 \text{ Kw}$
<b>Paredes</b>	$Q_P = 0.0593 \text{ Kw}$	$Q_P = 0.0742 \text{ Kw}$
<b>Motor</b>	$Q_M = 0.203 \text{ Kw}$	$Q_M = 0.203 \text{ Kw}$
<b>Luces</b>	$Q_L = 0.12 \text{ Kw}$	$Q_L = 0.12 \text{ Kw}$
<b>Cargas fijas</b> $Q_{CF} = Q_P + Q_M + Q_L$	$Q_{CF} = 0.3823 \text{ Kw}$	$Q_{CF} = 0.3972 \text{ Kw}$
<b>Resistencias</b> $Q_{R(60\%)} = Q_{T(60\%)} - Q_{CF}$	$Q_R = 1.11 \text{ Kw}$	$Q_R = 0.7987 \text{ Kw}$

Fuente: Autores.

### 3.3 TENIENDO EN CUENTA LA PERTURBACIONES

La transitoriedad se impondrá al sistema con cargas temporales adicionales con duración de 30 segundos cada 30 minutos, provenientes de la apertura de la puerta del cuarto frío. Esto dará lugar a un nuevo calor debido a la infiltración de aire a temperatura y humedad del ambiente exterior del cuarto, pues el sistema de refrigeración deberá llevarlo a las condiciones interiores: temperatura y humedad al interior del cuarto. En la tabla 15 se encuentra el cálculo de estas cargas.

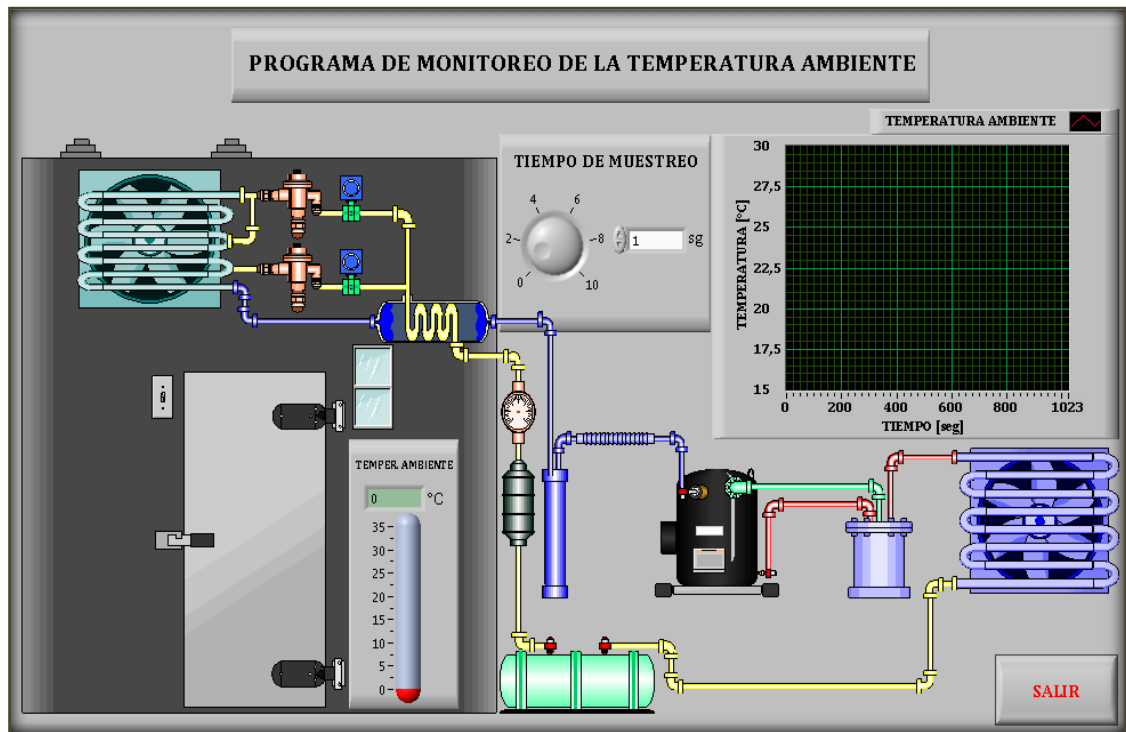
### 3.4 TEMPERATURA AMBIENTE EXTERNA

Debido a la influencia que tiene esta temperatura en el proceso de enfriamiento del cuarto de enfriamiento pues afecta tanto la temperatura de condensación como la carga por paredes e infiltraciones en el caso del escenario con perturbaciones, se realizó un seguimiento de la temperatura en las diferentes horas del día para

ver la variación de la misma. Se realizaron pruebas en días calurosos y en días fríos determinando una temperatura ambiente promedio de 21 °C.

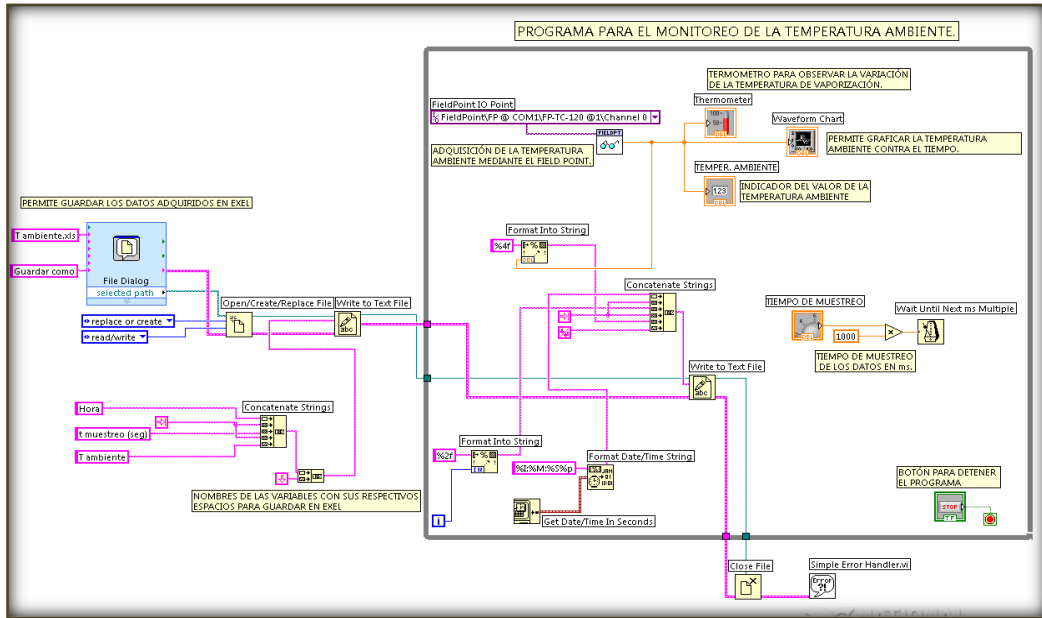
El monitoreo de la temperatura ambiente se realizó por medio de una termocupla tipo J con el sistema de adquisición de datos field point y con una interfaz de usuario en LabVIEW. En la figura 50 se puede observar el panel frontal del programa que se creó en LabVIEW para monitorear este parámetro y en la figura 51 se encuentra el respectivo diagrama de bloques de dicho programa. Las muestras se tomaron cada 1 minuto.

**Figura 50: Panel frontal del programa de monitoreo de la temperatura ambiente en LabVIEW**



Fuente: Autores.

**Figura 51: Diagrama de bloques del programa de monitoreo de la temperatura ambiente en LabVIEW**



Fuente: Autores.

Finalmente los escenarios para la determinación del consumo energético del cuarto frío empleados en este estudio se pueden resumir en la tabla 20. Como se puede ver se realizarán 20 pruebas una por cada escenario implementado para este estudio.

**Tabla 20: Escenarios de investigación para la determinación del consumo energético**

ESCENARIOS		CAPACIDAD 20%		CAPACIDAD 60%	
CONTROL	PERTURBACIONES	$T_{ev} = 0^{\circ}\text{C}$	$T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$	$T_{ev} = 0^{\circ}\text{C}$	$T_{ev} = -5^{\circ}\text{C}$
ON-OFF	SP <sup>1</sup>	X	X	X	X
	CP <sup>2</sup>	X	X	X	X
PID	SP	X	X	X	X
	CP	X	X	X	X
LÓGICA FUZZY	SP	X		X	
	CP	X		X	

1 SP: Sin perturbación. 2 CP: Con perturbación

Fuente: Autores.

## **4 IMPLEMENTACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL DEL CUARTO FRÍO DEL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN**

Para la realización de este proyecto se implementaron dos estrategias de control: estrategia de control ON-OFF y la estrategia de control continuo, para esta última se implemento tanto un control continuo con PID como un control continuo con lógica fuzzy.

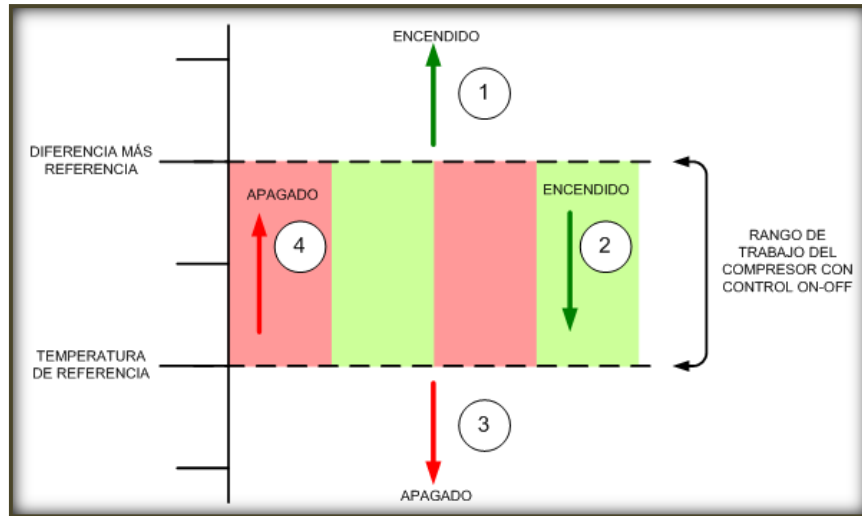
### **4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ON-OFF**

Esta estrategia de control es de dos posiciones: encendido ó apagado. Mediante el hardware basado en PC Field Point FP-DO-400 se le envía una señal digital de 0 ó 12V a un relé para que se apague o prenda el compresor dependiendo del intervalo en el que se encuentre la temperatura de vaporación que se este monitoreando.

El algoritmo de control ON-OFF fue programado por estados los cuales se muestran en la figura 52.

- Estado 1: Si la temperatura de vaporación es mayor o igual a la referencia más la diferencia, el compresor esta prendido.
- Estado 2: Si la temperatura de vaporación es menor que la referencia más la diferencia y mayor que la referencia y viene del estado 1, el compresor esta prendido.
- Estado 3: Si la temperatura de vaporación es menor o igual que la referencia, el compresor está apagado.
- Estado 4: Si la temperatura de vaporación es menor que la referencia más la diferencia y mayor que la referencia y viene del estado 3, el compresor está apagado.

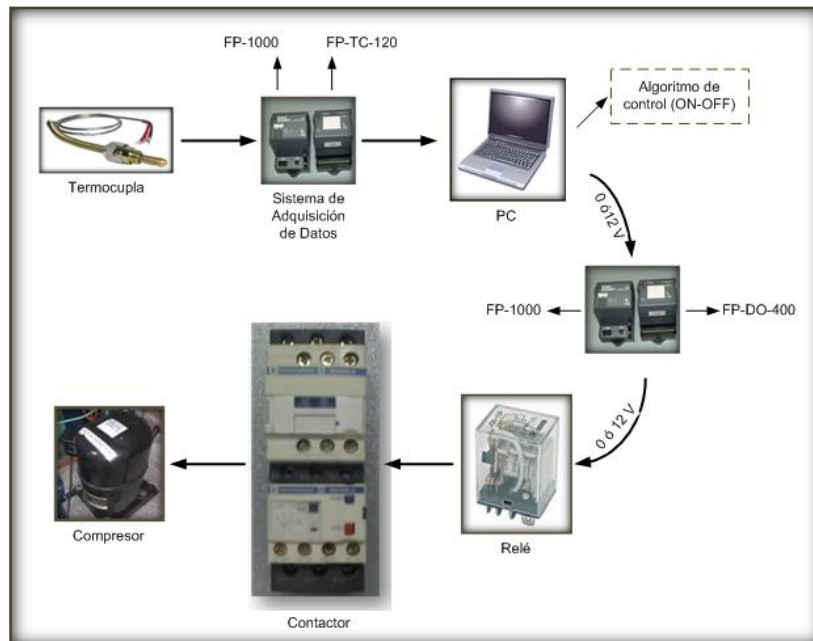
**Figura 52: Funcionamiento del algoritmo de control ON-OFF**



Fuente: Autores.

En la figura 53 se pueden ver los elementos usados para implementar la estrategia de control ON-OFF en el cuarto frío al igual que el flujo de la señal generada por el algoritmo de control ON-OFF desde el sensor de temperatura hasta el compresor.

**Figura 53: Implementación del control ON-OFF en el cuarto frío**



Fuente: Autores.

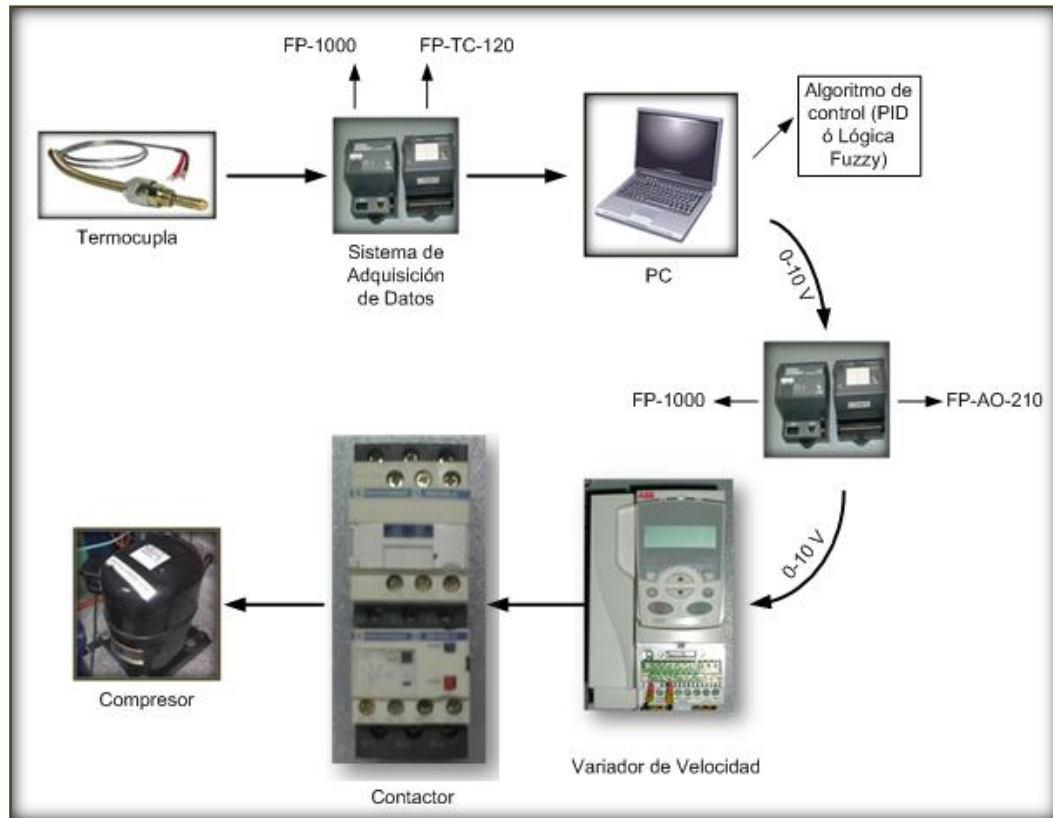
En resumen:

- ✓ Hardware de control: PC, Sistema de adquisición de datos y control de National Instruments.
- ✓ Software de control: LabVIEW
- ✓ Hardware de medición de potencia: Pinza Erasmus, pinza UNI-T 231 y pinza BK-PRESICION 325.
- ✓ Algoritmo de control: ON-OFF.
- ✓ Variable de control: Temperatura de vaporación.
- ✓ Set Point: Temperatura de evaporación de 0 °C y -5 °C.
- ✓ Histéresis: 2 °C.
- ✓ Capacidad: 20 y 60% de la capacidad nominal de cada temperatura de evaporación escogida.
- ✓ Carga: estable y transitoria.

## 4.2 CONTROL CONTINUO

La estrategia de control continuo se hará por medio de un control PID y de un control con lógica fuzzy. En la figura 54 se puede observar los elementos con los que cuenta la caja de control y el sistema de refrigeración del cuarto frío para implementar la estrategia de control continuo.

**Figura 54: Implementación del control continuo en el cuarto frío**



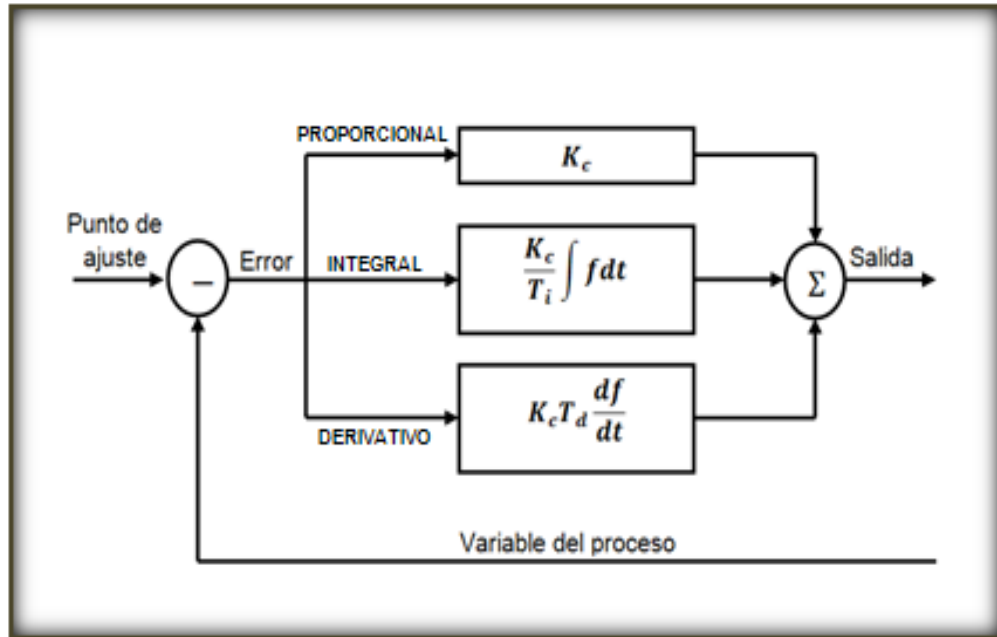
Fuente: Autores.

#### 4.2.1 Control continuo con PID

El control PID es uno de los más usados en la industria, es un controlador completo y complejo, tiene una respuesta más rápida y estable siempre que este bien sintonizado. Este tipo de control involucra tres acciones las cuales se pueden ver en la figura 55, cada uno de las cuales cumple con una función específica:

- El control proporcional (P): actúa sobre el tamaño del error.
- El control integral (I): rige el tiempo para corregir el error.
- El control derivativo (D): le brinda la rapidez de actuación.

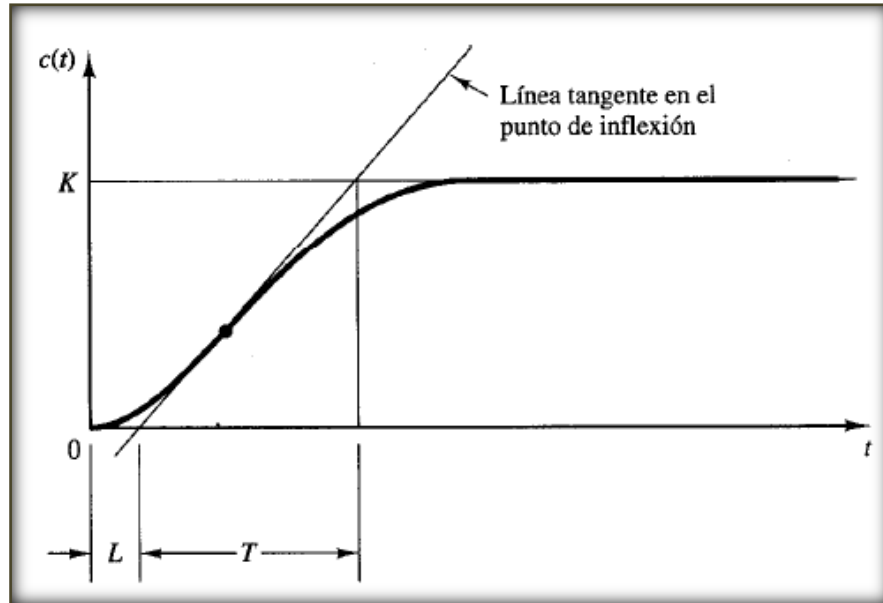
**Figura 55: Acciones independientes y combinadas que intervienen en un controlador PID**



Fuente: Autores.

Para la sintonización del PID lo cual significa establecer los valores de  $K_p, T_i, T_d$  se recurrió a los enfoques experimentales y reglas de Ziegler- Nichols debido a que la planta en estudio (Cuarto frío) es muy compleja para obtener un modelo matemático. El método que se usó fue el de respuesta escalón de la planta, el cual da una curva en forma de s (Ver figura 56), y los valores de L (tiempo de retardo) y T (constante de tiempo), que posteriormente se usaran en las reglas de sintonización mostradas en la tabla 21.

**Figura 56: Curva de respuesta en forma de S**



Fuente: Ingeniería de control moderna Ogata.

**Tabla 21: Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta**

TIPO DE CONTROLADOR	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

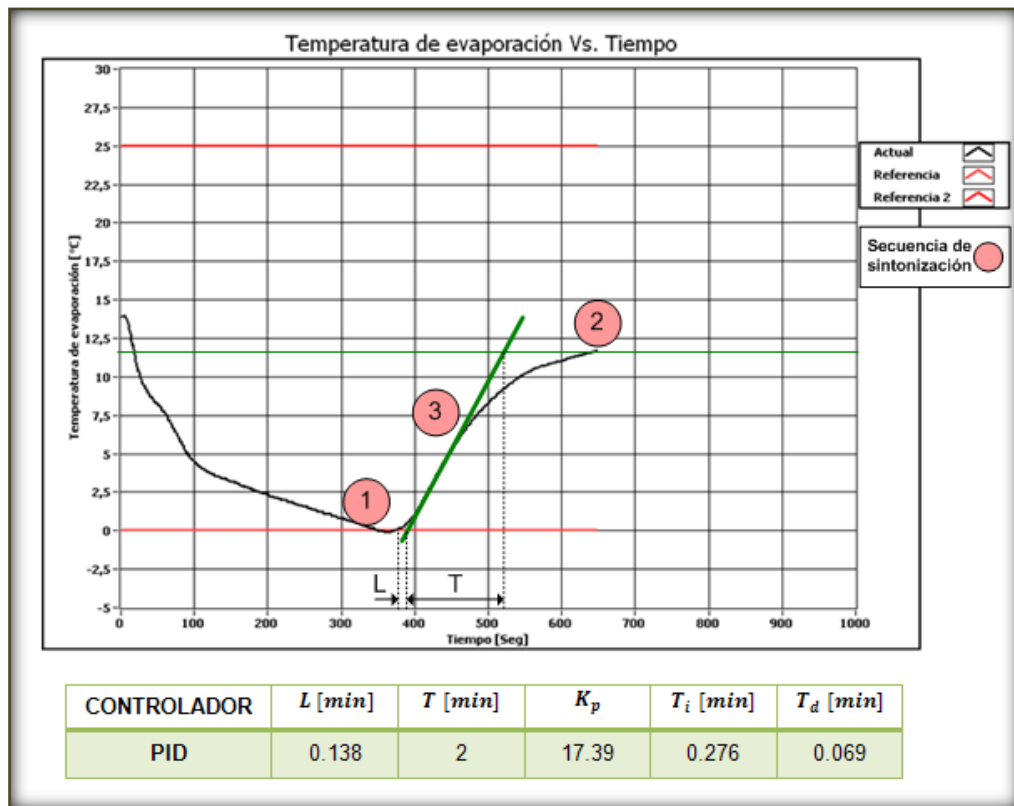
Fuente: Ingeniería de control moderna Ogata.

A continuación se explica como se aplicó este método al cuarto frío:

1. Se prendió el compresor a 1750 RPM.
2. Se dejó que el sistema llegará a una temperatura de vaporización de  $0^\circ\text{C}$ .

3. Luego se apago el sistema y se dejo que llegara a una temperatura de vaporización estable, para que se produjera la curva de el escalón unitario, conocida comúnmente como curva s.
4. Posteriormente a la curva que describió el sistema en forma de S al ir desde 0°C hasta la temperatura de estabilización se le trazo la tangente en el punto de inflexión para así determinar los valores de L y T.
5. Finalmente los resultados obtenidos tanto grafica como numéricamente fueron (Ver figura 57).

**Figura 57: Curva y parámetros de sintonización del cuarto frío**



Fuente: Autores.

Colocando los anteriores valores de  $K_p, T_i, T_d$  en el programa realizado en LabVIEW para el control PID se obtuvo un control aceptable el cual se fue

ajustando variando los valores de las constantes hasta finalmente encontrar los datos presentados en la tabla 22 para proporcionar un buen control.

**Tabla 22: Valores finales de las constantes del control PID del cuarto frío**

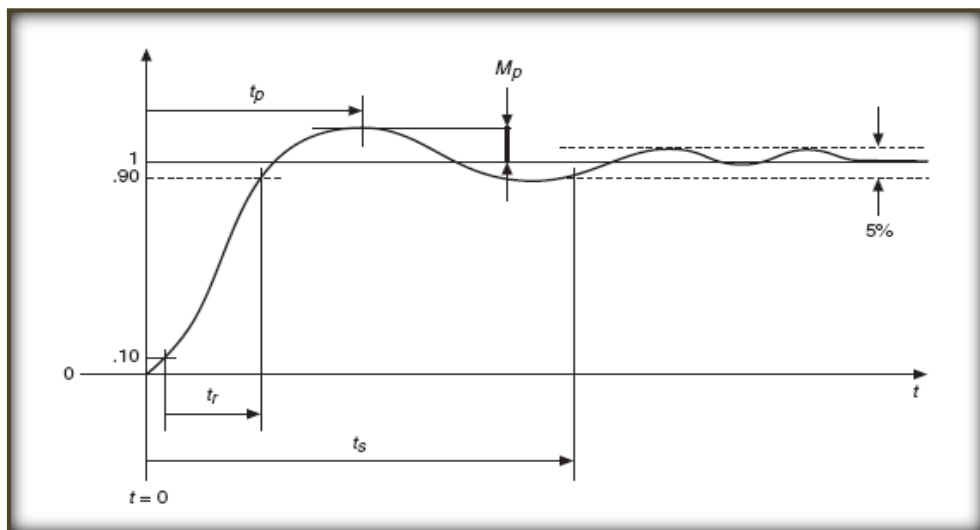
CONTROLADOR	$K_p$	$T_i$ [min]	$T_d$ [min]
PID	18	0.8	0

Fuente: Autores.

Para el ajuste de la sintonización se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Un aumento exagerado en la ganancia proporcional aumenta demasiado el error en estado estable.
- Una disminución exagerada del tiempo integrativo puede dejar el sistema inestable o en una condición de oscilación.
- Los sistemas térmicos no necesitan de tiempo derivativo.
- Las constantes mencionadas anteriormente se cuadraron tratando que la curva de respuesta del sistema de refrigeración se asemejara a la curva del control PID (Ver figura 58).

**Figura 58: Curva de respuesta de escalón unitario**



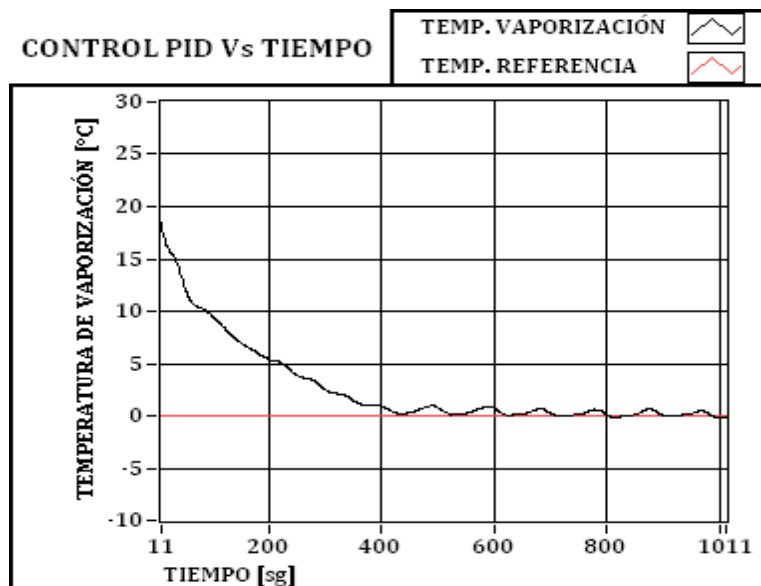
Fuente: LabVIEW, Control Design Toolkit User Manual.

Los términos presentados en la anterior grafica se definen a continuación:

- **Tiempo de subida ( $t_r$ ):** Es el tiempo que tarda el sistema en ir desde un 10% hasta 90% de la salida final o estado estable.
- **Tiempo pico ( $t_p$ ):** Es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico del sobrepaso.
- **Sobreimpulso máximo ( $M_p$ ):** Es la cantidad que la variable del proceso difiere del valor del estado estable.
- **Tiempo de establecimiento ( $t_s$ ):** Es el tiempo que tarda la variable de proceso en alcanzar un porcentaje del valor final, por ejemplo en alcanzar un 95% del valor final, a esto se le conoce como el criterio del 5%, que es bastante aceptable.
- **Error estable:** Es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida.

El resultado final de la sintonización del PID implementado para el control continuo del cuarto se presenta en la figura 59.

**Figura 59: Sintonización final del control PID**



Fuente: LabVIEW.

En resumen:

- ✓ Hardware de control: PC, sistema de adquisición de datos y control de National Instruments.
- ✓ Software de control: LabVIEW
- ✓ Hardware de medición de potencia: Pinza Erasmus, pinza UNI-T 231 y pinza BK-PRESICION 325.
- ✓ Algoritmo de control: PID.
- ✓ Variable de control: Temperatura de evaporación.
- ✓ Set Point: Temperatura de evaporación de 0 °C y -5 °C.
- ✓ Constantes del PID:
  - a. Constante Proporcional: 18.
  - b. Constante Integral: 0.8 min.
  - c. Constante Derivativa: 0 min.
- ✓ Capacidad: 20 y 60% de la capacidad nominal de cada temperatura de evaporación escogida.
- ✓ Carga: estable y transitoria.

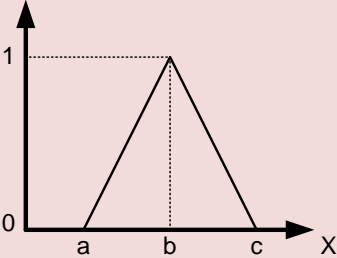
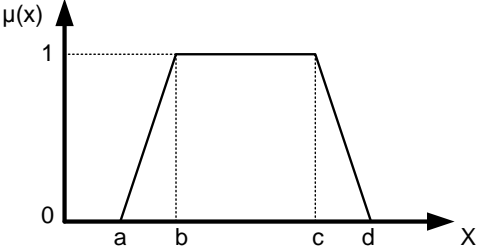
#### **4.2.2 Control continuo con LOGICA FUZZY**

En contraste con el PID, que usa conceptos absolutos para referirse a la realidad, la lógica fuzzy la define en grados de pertenencia a los mismos siguiendo patrones similares a los del pensamiento humano. La lógica fuzzy es una metodología que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta.

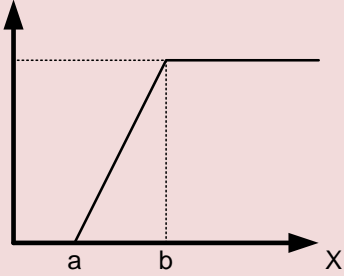
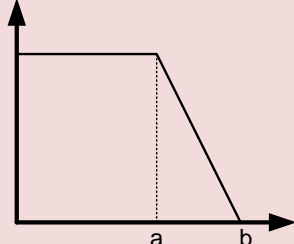
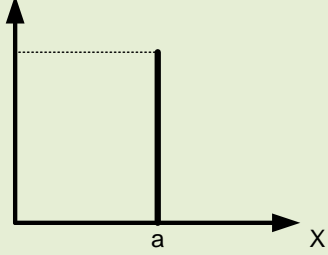
Para comprender la implementación de este control es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- Universo del discurso: rango de todos los valores posibles de la variable del sistema.
- Conjunto borroso: son aquellos cuyos elementos no tienen por qué pertenecer (grado de pertenencia 0) o pertenecer (grado de pertenencia 1), si no que pertenecen según un cierto grado entre 0 y 1.
- Variables lingüísticas: Es una variable cuyos valores son palabras o sentencias que se enmarcan en un lenguaje predeterminado.
- Términos lingüísticos: Son los valores cualitativos que pueden tomar las variables lingüísticas.
- Función de pertenencia: también llamadas funciones de membrecía son una forma de representar gráficamente un conjunto borroso sobre un universo (Ver tabla 23).

**Tabla 23: Funciones de pertenencia de la lógica fuzzy**

FUNCIÓN	ECUACIONES	GRAFICA
<b>TRIANGULAR</b>	$\mu_{\Delta}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{(x-a)}{b-a} & \text{si } x \in (a, b] \\ \frac{(c-x)}{c-b} & \text{si } x \in (b, c) \\ 0 & \text{si } x \geq c \end{cases}$	
<b>TRAPEZOIDAL</b>	$\mu_{\pi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a, \vee, x \geq d \\ \frac{(x-a)}{b-a} & \text{si } x \in (a, b) \\ 1 & \text{si } x \in [b, c] \\ \frac{(d-x)}{d-c} & \text{si } x \in (c, d) \end{cases}$	

**Tabla 23. (Continuación)**

FUNCIÓN	ECUACIONES	GRAFICA
<b>S</b>	$\mu_s(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{(x-a)}{b-a} & \text{si } x \in (a, b) \\ 1 & \text{si } x \geq c \end{cases}$	
<b>Z</b>	$\mu_z(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq a \\ \frac{(x-a)}{b-a} & \text{si } x \in (a, b) \\ 0 & \text{si } x \geq c \end{cases}$	
<b>SINGLETON</b>	$\mu_\delta(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = a \\ 0 & \text{si } x \neq a \end{cases}$	

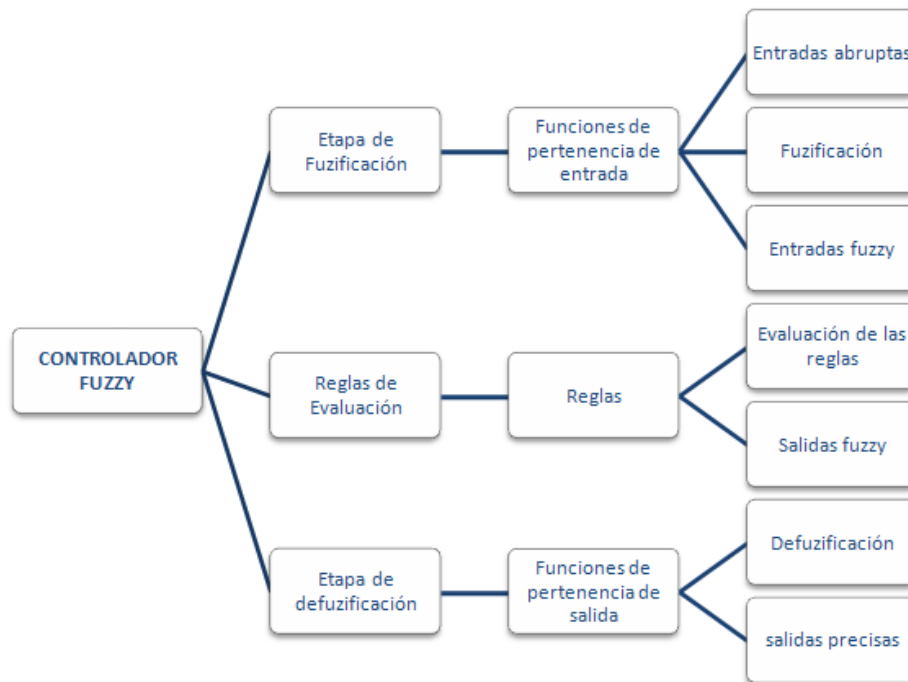
Fuente: Autores.

La estructura general de un controlador Fuzzy esta compuesto por tres etapas (Ver figura 60), que se explicaran a continuación:

- **Etapas de Fuzificación:** En esta etapa se calcula el grado de pertenencia que podría tener una entrada abrupta a una o varias funciones de pertenencia de una variable, el resultado se denomina entrada fuzzy. En esta etapa se llevan las entradas abruptas (lectura de las termocuplas) dentro de una representación lingüística.

- **Reglas de Evaluación:** En esta etapa usa reglas lingüísticas sobre los resultados generados en la etapa anterior. Las reglas fuzzy son sentencias Si-Entonces (If-Then) que describen la acción a ser tomada en respuesta a varias entradas fuzzy. El método de regla de evaluación mas común es llamado inferencia MIN-MÁX, ya que toma el mínimo de los antecedentes para determinar la fuerza de cada regla y toma la regla más fuerte para cada consecuente, los cuales determinan las salidas fuzzy.
- **Etapa de Defuzzificación:** Consiste en pasar las salidas fuzzy a un valor preciso, es decir, que las acciones de control pasan de ser cualitativas a cuantitativas. Los métodos más comunes de defuzzificación son el método de la media ponderada, método de centro de masa y método singleton.

**Figura 60: Etapas de un sistema fuzzy**



Fuente: Autores.

La sintonización de este control se realizó basada en los términos, variables y reglas de defuzzificación realizadas por el estudio *Fuzzy control of the compressor*

*speed in a refrigeration plant*<sup>11</sup> las cuales posteriormente se fueron ajustando de acuerdo a nuestro sistema para obtener finalmente las características mostradas en la tabla 24.

**Tabla 24: Diseño del control Fuzzy del cuarto frío**

DISEÑO DEL CONTROL FUZZY													
PARAMETRO	ENTRADAS									SALIDA			
Variables lingüísticas	Diferencia de Temperatura					Derivada del Error				Frecuencia			
Términos lingüísticos	MB	B	M	A	MA	B	M	A	MB	B	M	A	MA
Universo de discurso	(-1) a (25)					(0) a (0.075)				(12) a (60)			
Funciones de Pertenencia	Triangular, S y Z					Triangular				Triangular			
Método de defuzzificación	Centro de gravedad												
Método de inferencia	MAX-MIN												
MB: Muy bajo; B: Bajo; M: Medio; A: Alto; MA: Muy alto.													

Fuente: Autores.

En resumen:

- ✓ Hardware de control: PC, sistema de adquisición de datos y control de National Instruments.
- ✓ Software de control: LabVIEW
- ✓ Hardware de medición de potencia: Pinza Erasmus, pinza UNI-T 231 y pinza BK-PRESICION 325.
- ✓ Algoritmo de control: Lógica Fuzzy, ver tabla 24.
- ✓ Variable de control: Temperatura de evaporación.
- ✓ Set Point: Temperatura de evaporación de 0 °C.
- ✓ Capacidad: 20 y 60% de la capacidad nominal de cada temperatura de evaporación escogida.
- ✓ Carga: estable y transitoria.

<sup>11</sup> Paper del ELSEVIER, realizado por C Aprea, R Mastrullo, C Renno.

## 5 PRUEBAS

### 5.1 PROGRAMA DE MONITOREO Y CONTROL

Para la toma de datos se realizó un programa en LabVIEW compuesto por seis pestañas (Ver figura 61). Este programa permite el monitoreo y almacenamiento de las temperaturas sensadas por las termocuplas descritas en el capítulo 2, cuenta con una interfaz de usuario para seleccionar entre el cálculo de cargas y los tres tipos de control manejados en este estudio (ON-OFF, PID y LOGICA FUZZY), introducir la temperatura de vaporización de referencia y el tiempo de muestreo. Este programa cuenta con dos ventanas una llamada panel frontal que es la interfaz de usuario y otra llamada diagrama de bloque donde se encuentra la programación en forma gráfica. A continuación se explicara cada una de las pestañas que se encuentran en el programa. En el anexo D se explica la forma en la que se debe configurar el hardware y software implementados en este estudio, para poder ejecutar este programa de monitoreo y control.

**Figura 61: Pestañas del programa de monitoreo y control**



Fuente: Autores.

### 5.1.1 Presentación

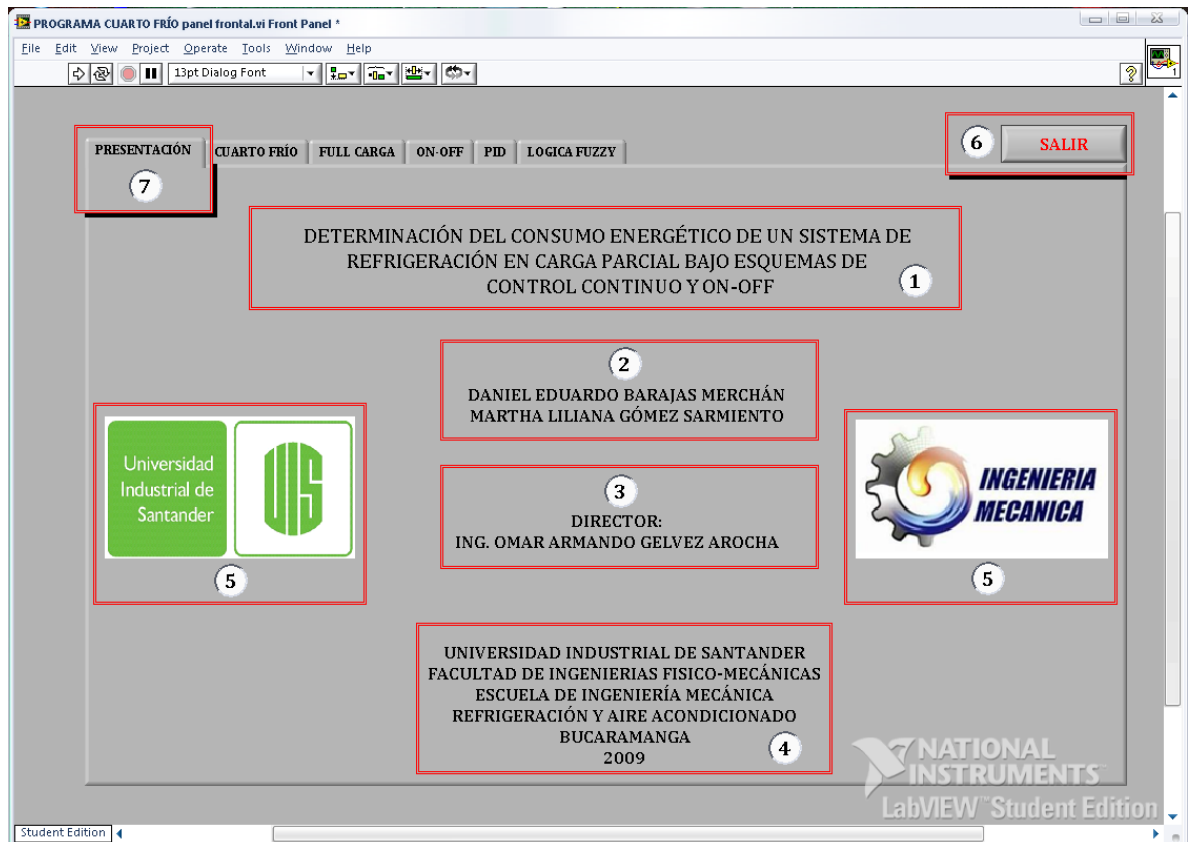
En esta pestaña se encuentra la información general del proyecto de grado y un botón que permite detener la ejecución del programa cuando el usuario lo desee.

#### 5.1.1.1 Panel Frontal de la pestaña Presentación

Esta pantalla (Ver figura 62) está compuesta por las siguientes partes:

1. Nombre del proyecto de grado
2. Autores del proyecto de grado.
3. Director del proyecto de grado.

**Figura 62: Panel Frontal de la pestaña Presentación**



Fuente: Autores.

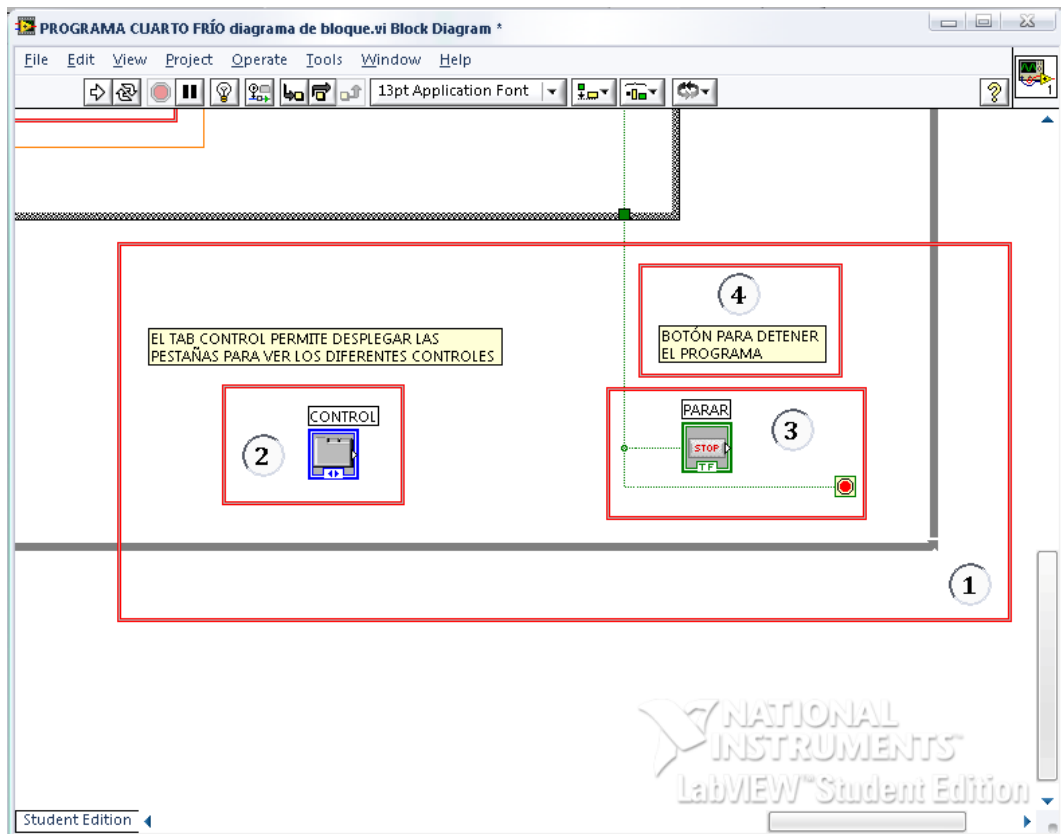
4. Universidad, facultad, escuela, área, lugar y año en el que se realizó el proyecto de grado.
5. Logos de la universidad y escuela donde se realizó el proyecto de grado.
6. Botón que permite detener la ejecución del programa (salir).
7. Nombre de la pestaña ejecutada (Presentación).

### 5.1.1.2 Diagrama de Bloque de la pestaña presentación

Esta pantalla (Ver figura 63) muestra la programación general del programa:

1. Estructura while que ejecuta el programa en general.

**Figura 63: Diagrama de Bloque de la pestaña Presentación**



Fuente: Autores.

2. El Tab control que es el encargado de permitir ver las hojas en forma de pestaña: Presentación, cuarto frío, full carga, ON-OFF, PID y lógica fuzzy.
3. Botón salir que permite detener la ejecución del while.
4. Son avisos que permiten al usuario saber para que se usó determinado icono dentro de la programación.

### **5.1.2 Cuarto frío**

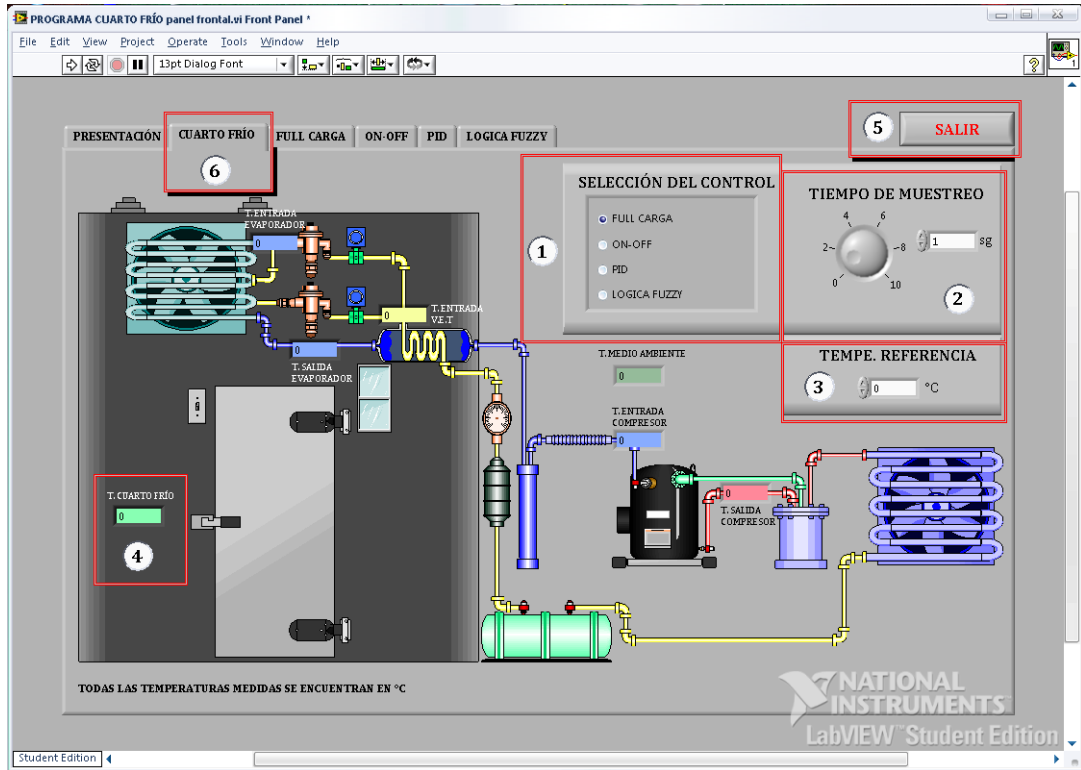
En esta pestaña se puede ver un esquema general del cuarto frío en estudio y permite al usuario colocar los datos principales para cualquier pestaña: temperatura de referencia, tiempo de muestreo y selección del control.

#### ***5.1.2.1 Panel Frontal de la pestaña cuarto frío***

Los elementos que componen esta pantalla (Ver figura 64) son:

1. Selección de control: permite seleccionar con que control se van a realizar las pruebas.
2. Tiempo de muestreo: es el tiempo en que ocurrirá cada iteración del while y el tiempo en el que se irán guardando los datos en Excel generados por el Field Point de termocuplas.
3. Temperatura de referencia: es la temperatura para la cual se desea realizar el control que en este estudio será la temperatura de vaporación de 0 °C y - 5 °C.
4. Indicadores numéricos: permitirán visualizar las temperaturas censadas por las termocuplas.
5. Botón salir para detener la ejecución del programa.
6. Pestaña ejecutada (Cuarto frío).

**Figura 64: Panel Frontal de la pestaña Cuarto Frío**



Fuente: Autores.

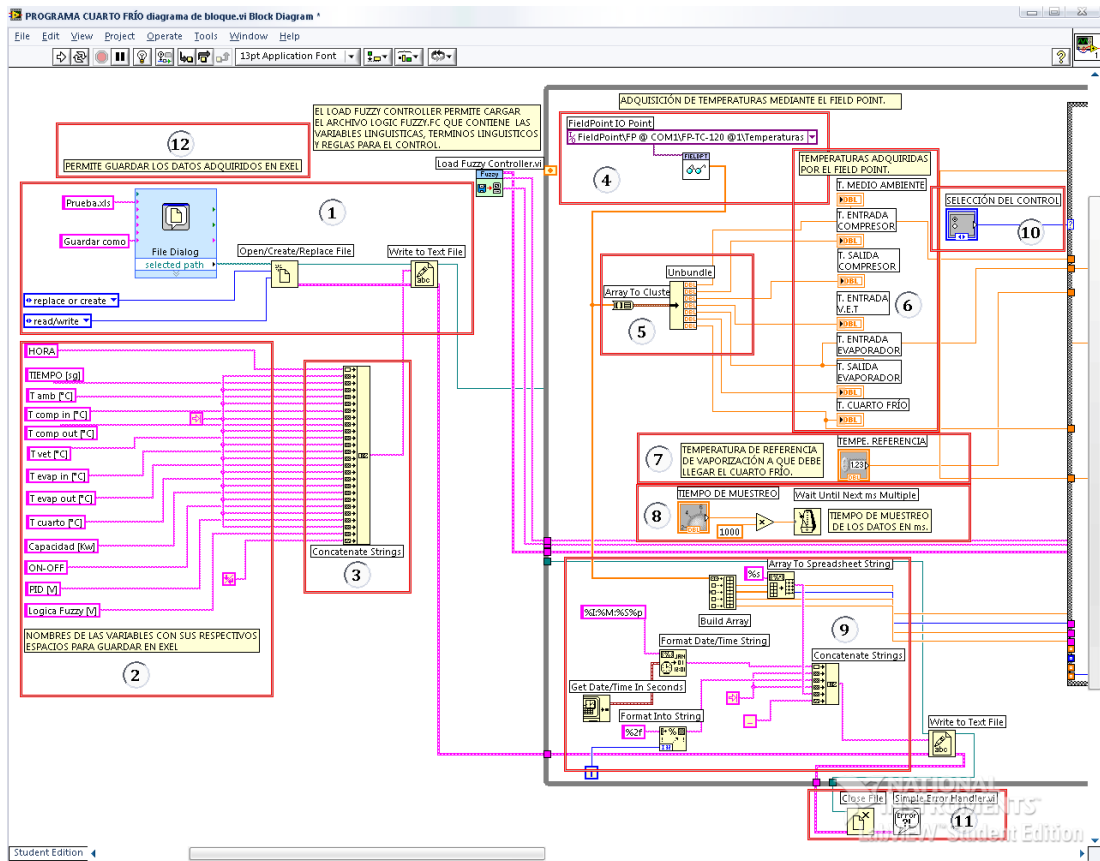
### **5.1.2.2 Diagrama de Bloque de la pestaña Cuarto Frío**

La ventana (Ver figura 65) está compuesto por las siguientes partes:

1. Permite abrir un archivo de Excel con el nombre dado.
2. Son las constantes de textos que llevaran por nombre las columnas del archivo en Excel.
3. Une todos los strings de textos para sacar finalmente una sola salida para escribirla.
4. Configura el canal o canales del Field Point FP-TC-120 que va a leer las temperaturas de monitoreo.
5. Descodifica el array de temperaturas para mostrarlas individualmente.
6. Son los indicadores de las temperaturas monitoreadas.

7. Es la temperatura de referencia que se esta manejando para la prueba.
8. Este control numérico permite decir cada cuanto (en segundos) se realizará la iteración del while.
9. Es la programación para poder convertir la fecha, el número de iteraciones, y las temperaturas a strings para poder ser escritas en el archivo de Excel creado anteriormente.
10. El radio button se encuentra conectado al case que permite seleccionar que tipo de control se va a realizar.
11. Cierra la operación de la creación del archivo en Excel.
12. Son los avisos informativos que se encontraran a lo largo de la programación.

**Figura 65: Diagrama de Bloque de la pestaña Cuarto frío**



Fuente: Autores.

### **5.1.3 Full carga**

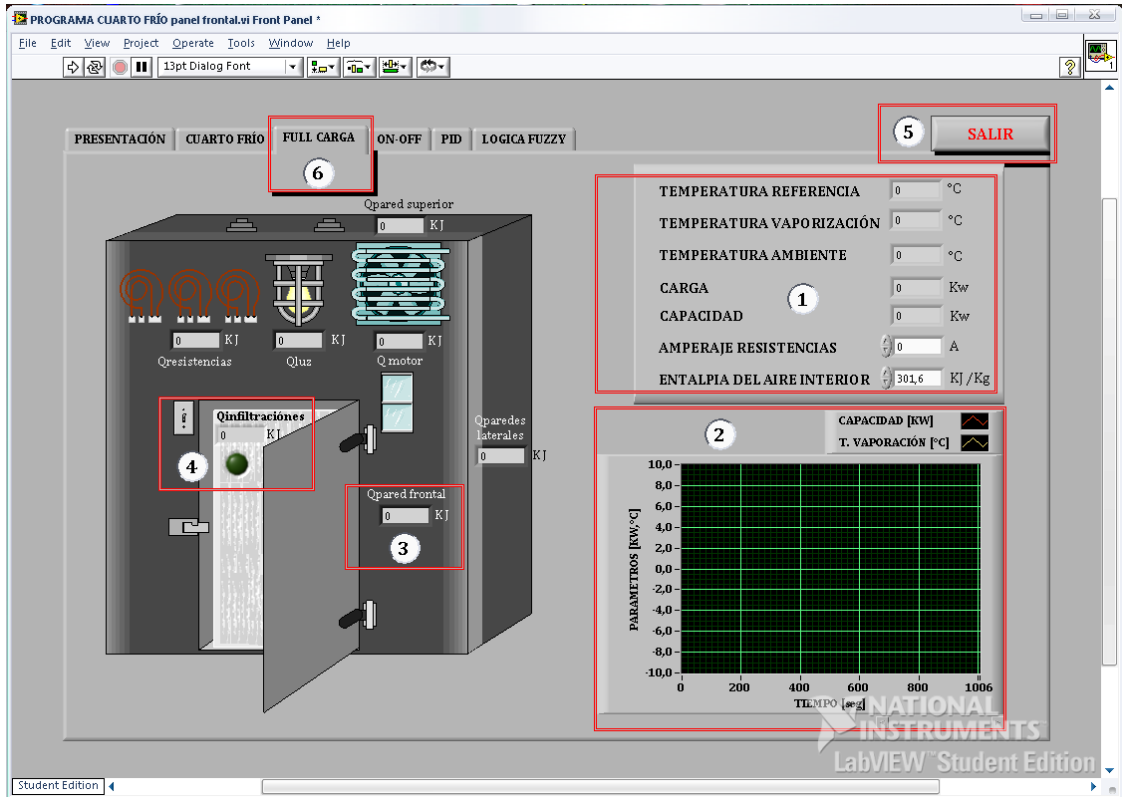
Este programa permite calcular la carga instantánea del sistema a cada temperatura de vaporación en estudio y graficar el comportamiento de la capacidad y la temperatura de evaporación en el tiempo.

#### **5.1.3.1 Panel Frontal de la pestaña Full Carga**

Esta ventana (Ver figura 66) está compuesta por las siguientes partes:

1. Indicadores y controles numéricos: los 5 primeros son indicadores que permiten ver la temperatura de referencia que previamente se escogió en la pestaña de cuarto frío, la temperatura actual de evaporación y del medio ambiente. la carga y capacidad instantánea. Los dos últimos son dos controles numéricos en los cuales el usuario debe introducir la corriente consumida por las resistencia medidas previamente con una pinza y la entalpia del aire interior en caso de que la prueba sea con perturbaciones como son las aperturas de la puerta del cuarto de frío.
2. Grafica: ilustra el comportamiento de la capacidad y temperatura de vaporación con el tiempo.
3. Indicadores numéricos: permiten visualizar las diferentes cargas que posee el cuarto (resistencias, motor, puerta, paredes, luces).
4. Led indicador. Permite saber cuando las cargas por infiltraciones están activadas.
5. Botón: el mismo que se viene manejando en las anteriores pestañas para detener la ejecución del programa.
6. Pestaña ejecutada (Full carga).

**Figura 66: Panel Frontal de la pestaña Full Carga**



Fuente: Autores.

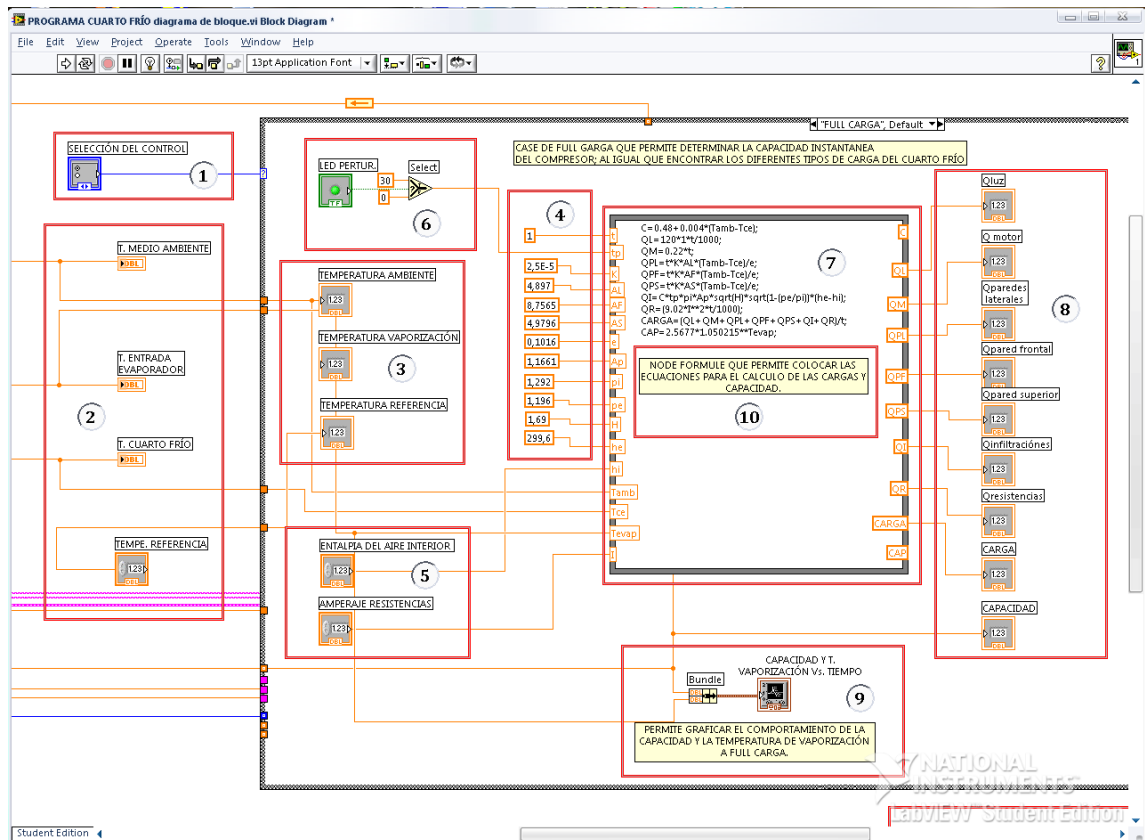
### 5.1.3.2 Diagrama de Bloque de la pestaña Full Carga

Esta pestaña (Ver figura 67) cuenta principalmente con las siguientes partes:

1. Radio button: que permite al usuario seleccionar el tipo de control en este caso se debió haber seleccionado Full carga para que en el case aparezca esta programación.
2. Indicadores numéricos: estos indicadores son las entradas del case, la temperatura ambiente, la temperatura de evaporación, la temperatura del cuarto frío y la temperatura de referencia.

3. Indicadores numéricos: permiten visualizar tres temperaturas en el panel frontal de esta pestaña, la temperatura de evaporación, la ambiente y la de referencia.
4. Constantes: son las entradas al nodo formula.
5. Controles numéricos: estos dos controles son entradas al nodo formula pero se encuentran cambiando de acuerdo a los datos que el usuario introduzca en las casillas del panel frontal del amperaje de las resistencias y en la entalpia del aire interior.
6. Selector: activa la carga por infiltraciones cuando el usuario desee.
7. Nodo formula: acá se encuentran todas las formulas que se usaron para calcular las diferentes cargas del cuarto.

**Figura 67: Diagrama de Bloque de la pestaña Full Carga**



Fuente: Autores.

8. Indicadores numéricos: son las salidas del nodo formula.
9. Grafica: Es la programación que permite ver la grafica de la capacidad y la temperatura de vaporación en el panel frontal.
10. Avisos informativos.

#### **5.1.4 ON-OFF**

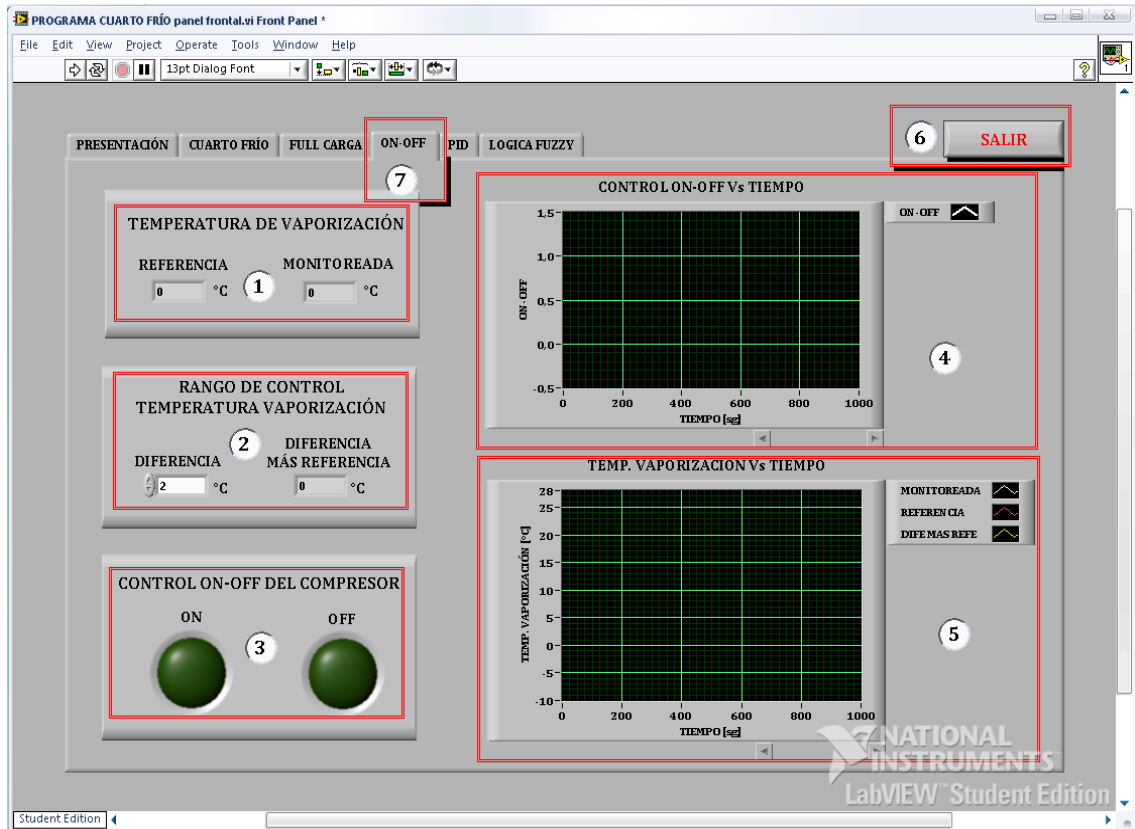
Por medio de esta pestaña el usuario puede saber en que momento el compresor esta prendido o apagado, al igual puede observar el comportamiento de las temperaturas de evaporación y del control ON-OFF.

##### ***5.1.4.1 Panel Frontal de la pestaña ON-OFF***

Esta pantalla (Ver figura 68) está compuesta por las siguientes partes:

1. Indicadores numéricos: muestran la temperatura de evaporación tanto la de referencia dada en la pestaña del cuarto frío como la actual.
2. Indicadores numéricos: muestran la diferencia de temperatura que se va a trabajar para el control ON-OFF, es decir, el rango de operación en el que va a estar oscilando la temperatura de vaporación.
3. Leds: indican en que momento en compresor esta prendido o apagado.
4. Grafica 1: muestra cuanto tiempo el compresor estuvo ON y cuanto estuvo OFF.
5. Grafica 2: es el comportamiento de las temperaturas de evaporación (referencia, monitoreada y diferencia más referencia) en el tiempo.
6. Botón: salir para detener la ejecución del programa.

**Figura 68: Panel Frontal de la pestaña de control ON-OFF**



Fuente: Autores.

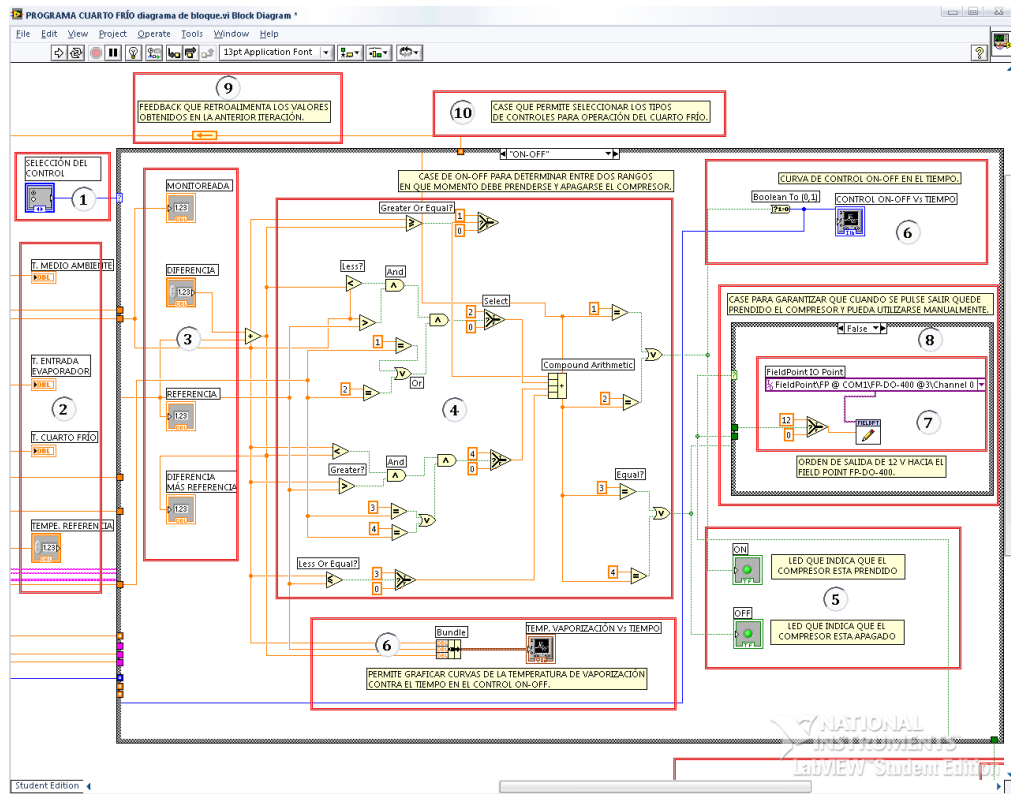
#### **5.1.4.2 Diagrama de Bloque de la pestaña ON-OFF**

Esta pestaña (Ver figura 69) tiene las siguientes partes:

1. Radio button: permite escoger del case el control ON-OFF.
2. Indicadores y controles numéricos: son las entradas del case de ON-OFF las cuales son la temperatura de evaporación actual y la temperatura de referencia.
3. Indicadores y controles numéricos: son los valores que se van a comparar para determinar si el compresor debe estar prendido o apagado.

4. Elementos de comparación: comparan los valores de la temperatura de vaporación para arrojar un resultado a un sumador y establecer el estado del compresor.
5. Leds: indican si el compresor esta ON ó OFF.
6. Graficas: programación de las dos graficas que el usuario ve en el panel frontal de esta pestaña (comportamiento de la temperatura de vaporación y del control ON-OFF en el tiempo).
7. Lector: envía una señal (0 ó 12V) del control ON-OFF al modulo Field Point FP-DO-400.
8. Case: permite restear el control
9. Feedback: retroalimenta los datos obtenidos en la anterior iteración.
10. Avisos explicativos.

**Figura 69: Diagrama de Bloque de la pestaña ON-OFF**



Fuente: Autores.

### 5.1.5 PID

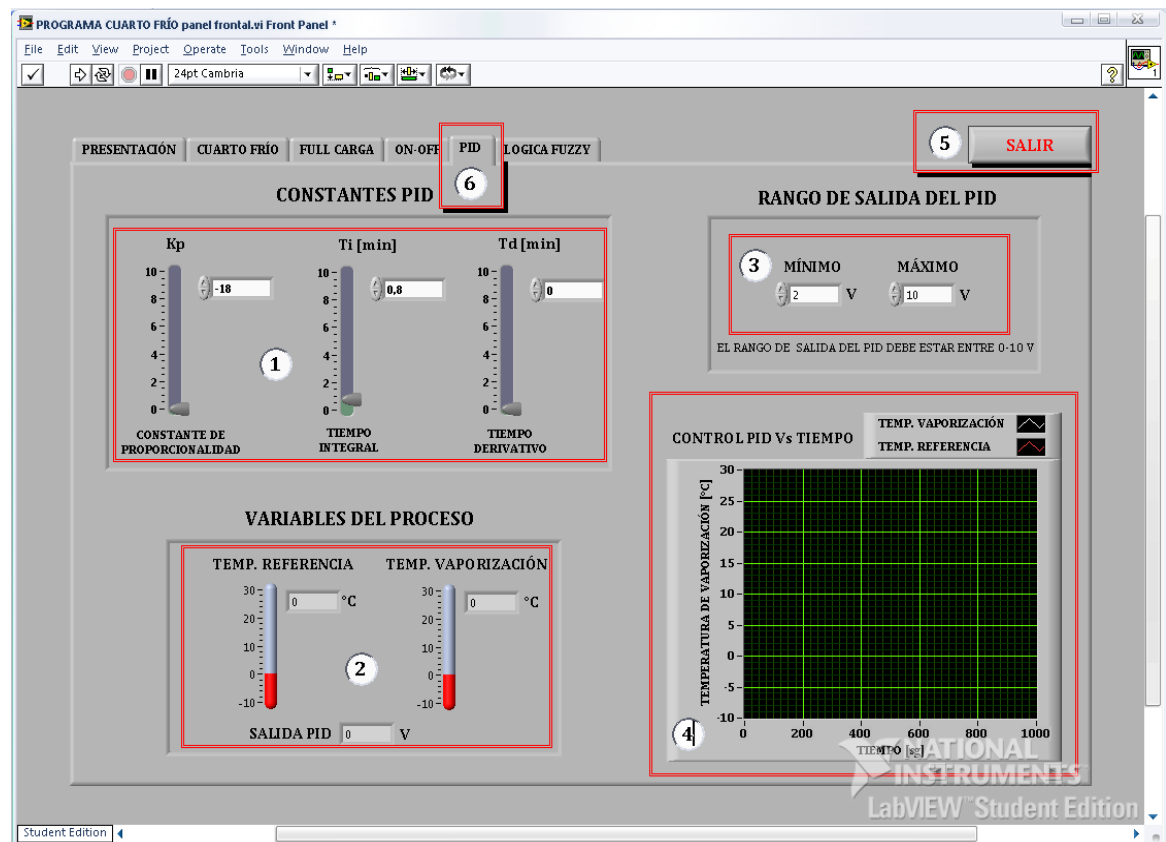
Este control es continuo y permite enviar al variador de velocidad una señal entre 0-10 voltios con el fin de que el varié la velocidad del compresor de acuerdo a la carga que hay en el cuarto frío.

#### 5.1.5.1 Panel Frontal de la pestaña PID

Esta pantalla (Ver figura 70) se encuentra compuesta por las siguientes partes:

1. Controles deslizantes: permiten al usuario sintonizar el PID ya que contiene las constantes del PID.

Figura 70: Panel Frontal de la pestaña PID



Fuente: Autores.

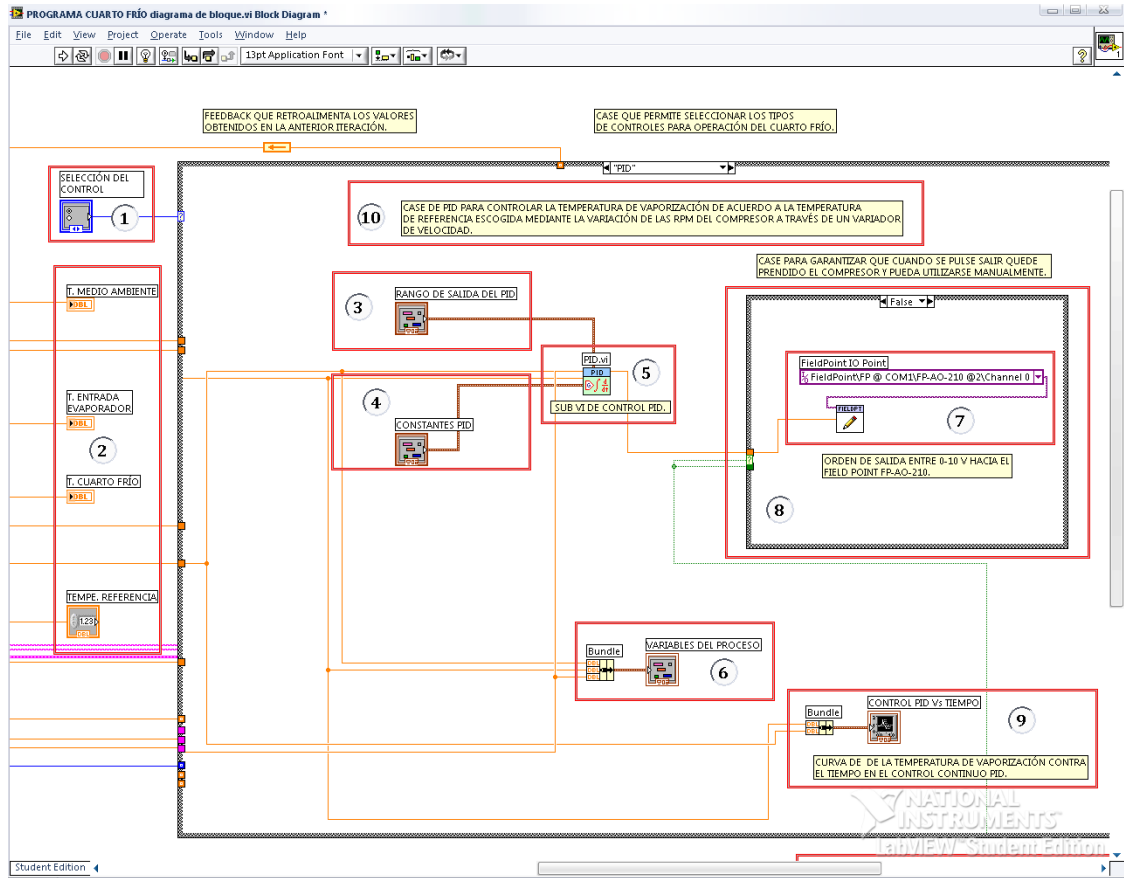
2. Indicadores: los dos termómetros indican la temperatura de evaporación tanto la actual como la de referencia y el otro indicador numérico permite visualizar el voltaje de salida del PID.
3. Cluster: contiene los rangos de salida del PID.
4. Grafica: permite ver el control PID de la temperatura de evaporación.
5. Botón: salir, permite detener la ejecución del programa.
6. Pestaña en ejecución (PID).

### ***5.1.5.2 Diagrama de Bloque de la pestaña PID***

La programación de esta pestaña (Ver figura 71) está compuesta por los siguientes ítems:

1. Radio button: selecciona del case el control PID.
2. Indicadores numéricos: Son las entradas al case de PID la temperatura de evaporación monitoreada y la de referencia.
3. Cluster: contiene el rango de salida del PID.
4. Cluster: contienen las constantes del PID: proporcional, integral y derivativa.
5. SubVI: este el icono del PID.
6. Cluster: contiene los datos del proceso las temperaturas de evaporación y la salida del PID.
7. Lector: envía la señal de salida (0-10V) del PID al Field Point FP-AO-210.
8. Case: permite resetear el control.
9. Grafica: permite visualizar el control PID de la temperatura de evaporación.
10. Avisos informativos.

**Figura 71: Diagrama de Bloque de la pestaña PID**



Fuente: Autores.

### 5.1.6 LOGICA FUZZY

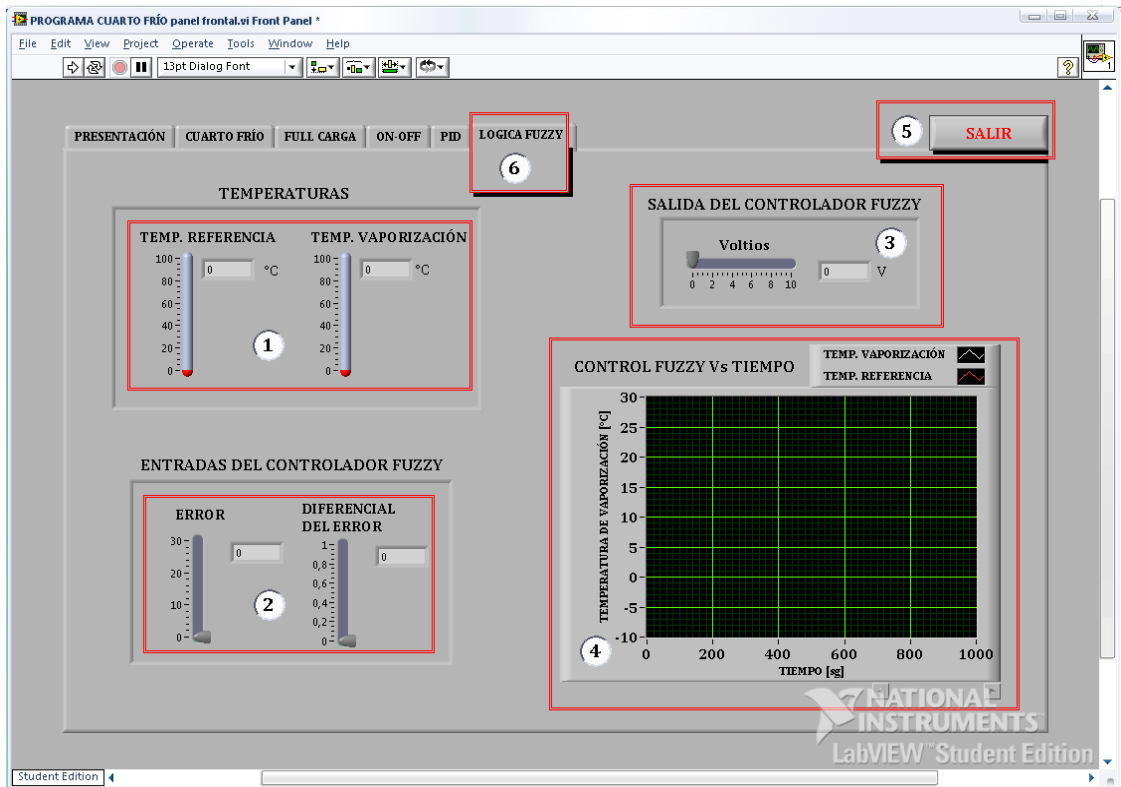
Este control fuzzy al igual que el PID permite enviar una señal entre 0-10V al variador para poder modificar la velocidad del compresor de acuerdo a la carga impuesta en el sistema de refrigeración con el fin de mantener constante la temperatura de vaporación.

### 5.1.6.1 Panel Frontal de la pestaña Lógica Fuzzy

Esta pestaña (Ver figura 72) está compuesta por:

1. Indicadores: permiten visualizar las temperaturas de vaporación (monitoreada y referencia).
2. Indicadores: muestran el valor de las variables lingüísticas usadas en el control FUZZY.
3. Barra deslizante: indica la salida de voltaje del control FUZZY.
4. Grafica: permite ver el control fuzzy de la temperatura de vaporación en el tiempo.
5. Botón: salir, detiene la ejecución del programa.
6. Pestaña en ejecución (Lógica Fuzzy).

Figura 72: Panel Frontal de la pestaña Lógica Fuzzy



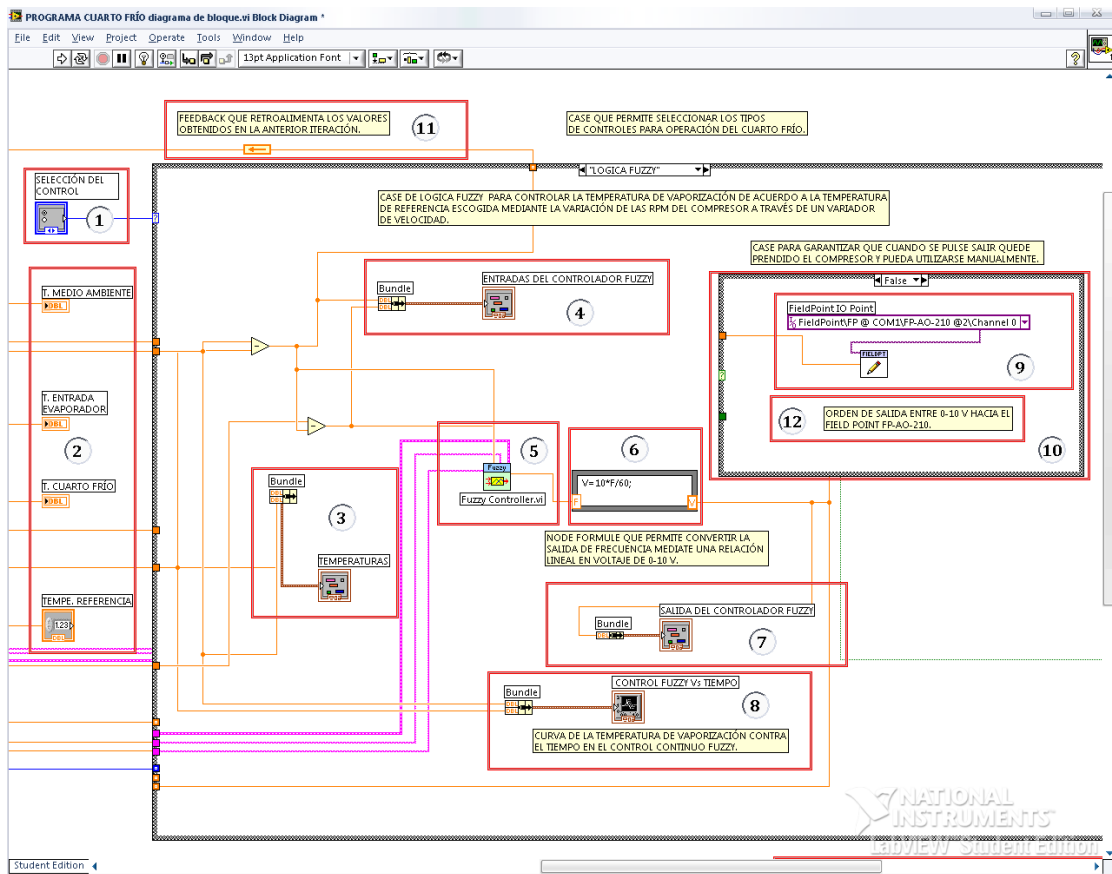
Fuente: Autores.

### 5.1.6.2 Diagrama de Bloque de la pestaña Lógica Fuzzy

La programación de esta pestaña (ver figura 73) está compuesta por los siguientes elementos:

1. Radio button: permite escoger el control FUZZY.
2. Indicadores: son las entradas al case de lógica fuzzy.
3. Cluster. de temperaturas de vaporación (monitoreada y referencia).
4. Cluster: de las variables lingüísticas del control FUZZY.
5. SubVI: de Lógica Fuzzy.

Figura 73: Diagrama de Bloque de la pestaña Lógica Fuzzy



Fuente: Autores.

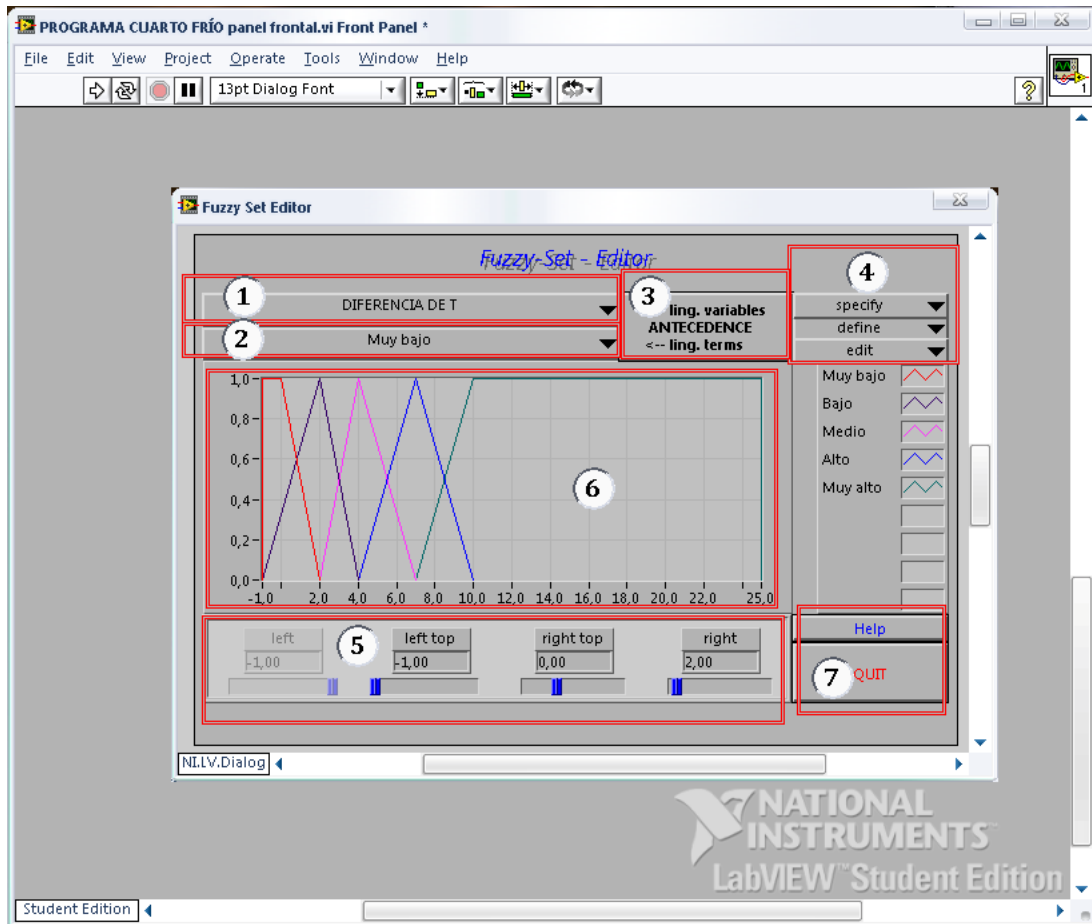
6. Nodo fórmula: convierte la salida del control FUZZY de frecuencia a voltios.
7. Indicador: muestra la salida del control FUZZY en voltios.
8. Grafica: permite ver el comportamiento de la temperatura de vaporación con el control FUZZY en el tiempo.
9. Lector: envía una señal entre 0-10V al modulo FP-AO-210.
10. Case: reset del control FUZZY.
11. Feedback: retroalimenta el valor del error de la iteración anterior.
12. Avisos informativos.

Para poder ejecutar el control fuzzy se debe cargar un archivo .fc que contiene los rangos de operación de los térmicos lingüísticos de las variables lingüísticas y las reglas de desfuzificación del control FUZZY. Este archivo está compuesto por dos ventanas: Fuzzy-Set-Editor y Rulebase-Editor, a continuación se mostraran los que contienen estas ventanas.

➤ **Fuzzy-Set-Editor:** Esta ventana (Ver figura 74) está compuesta por:

1. Selector de las variables lingüísticas (Diferencia de temperatura, derivada de la diferencia de temperatura y frecuencia).
2. Selector de los términos lingüísticos.
3. Botón que permite pasar de los antecedentes (Diferencia y derivada de la diferencia de temperatura) al consecuente (frecuencia).
4. Editor de funciones, sirve para cambiar los rangos del universo de discurso, editar, adicionar o eliminar términos o variables.
5. Botones deslizantes que permiten cuadran la función de membrecía de cada término lingüístico.
6. Funciones de membrecía usadas para cada término.
7. Botón de salir y ayuda.

Figura 74: Fuzzy Set Editor del control FUZZY

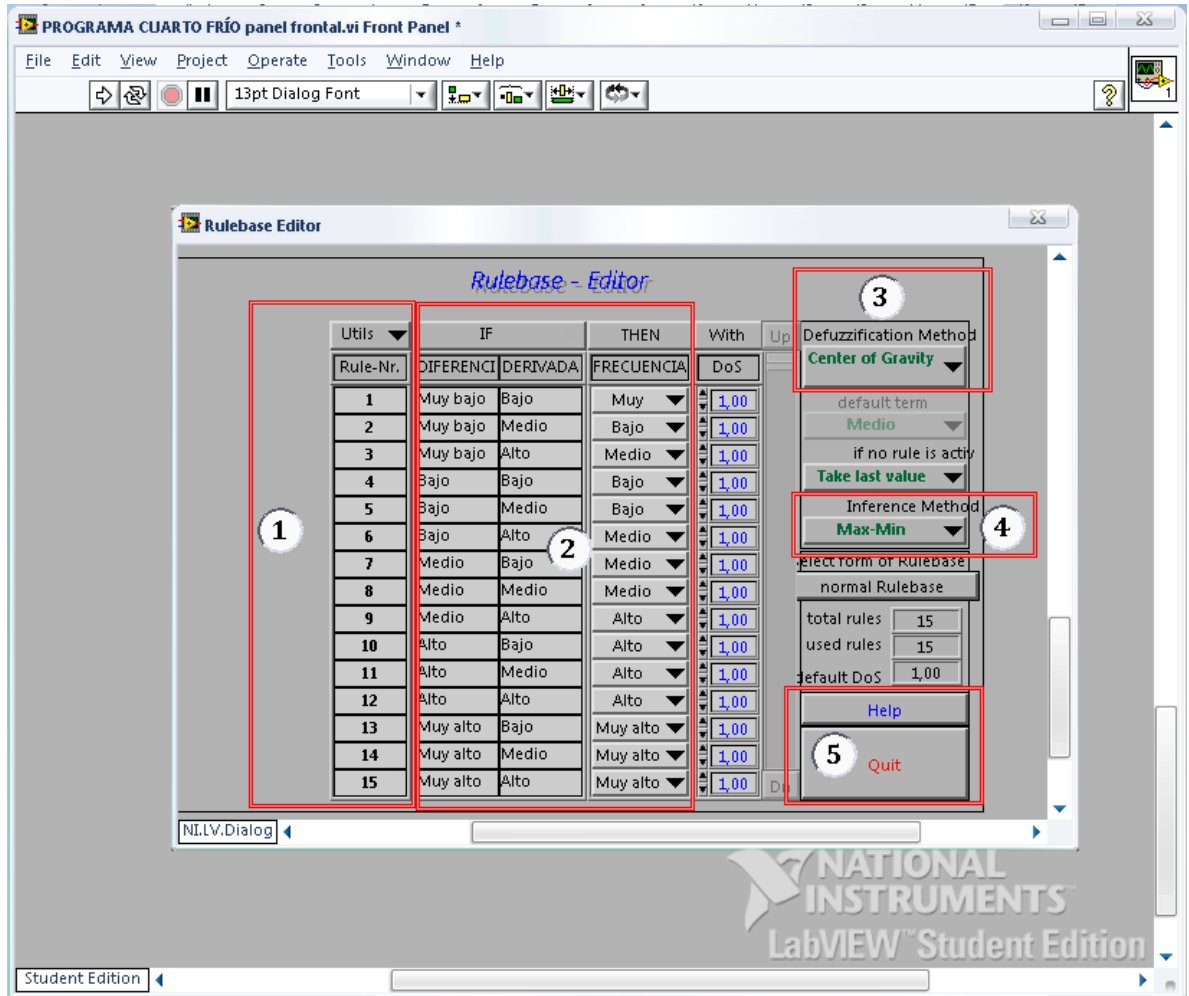


Fuente: Autores.

➤ Rulebase-Editor: Esta ventana (ver figura 75) contiene:

1. Número de reglas.
2. Reglas Fuzzy, sentencias IF-THEN.
3. Método de desfuzificación: Centro de gravedad.
4. Método de inferencia: Máx-Mín.
5. Botón de salir y ayuda.

**Figura 75: Rulebase-Editor del control FUZZY**



Fuente: Autores.


## 5.2 TOMA DE DATOS

En este estudio se realizaron 20 pruebas con los escenarios nombrados en la tabla 20. Las pruebas se hicieron en el horario de 12:00:00 am a 10:00:00 am debido a que la variación de la temperatura ambiente es mínima, y así no se afectan los resultados de las mismas. Para cada una de las pruebas se realizó en siguiente procedimiento:


1. Alimentación de la caja de control por medio del interruptor termomagnético.
  2. Se cuadro el sistema con el ajuste de carga respectivo (20% y 60%).
  3. Se dio alimentación al hardware de control Field Point para empezar a almacenar datos y enviar señales digitales al relé (control ON-OFF) ó señales análogas al variador de velocidad (control continuo).
  4. Puesta en marcha del sistema (prendido del condensador, evaporador, compresor y alimentación de solenoides).
  5. Se espero a que la temperatura de vaporación llegara a la de referencia (0°C y -5°C) para empezar a tomar los datos de:
    - Pinzas: potencia, corriente, voltaje, factor de potencia de cada línea del compresor.
    - Amperímetro: corrientes de cada línea del sistema.
    - Manómetros: presiones de baja y de alta.
    - Termocuplas: temperaturas ambiente, entrada y salida del compresor, entrada VET, entrada y salida del evaporador y cuarto.
- Los datos medidos por las pinzas, el amperímetro y los manómetros se tomaron cada minuto, mientras que las temperaturas cada segundo por la facilidad de almacenamiento de datos que brinda LabVIEW.
6. Se tomaron datos durante 2 horas para cada prueba.
  7. En el caso de los escenarios con perturbaciones se abrió la puerta durante 30 seg cada 30 minutos produciéndose las perturbaciones a los 10, 40, 70 y 100 minutos transcurridos desde el inicio de la toma de datos.

En las tablas 25 y 26 se muestran los formatos que se usaron para la toma de datos de las variables térmicas y eléctricas respectivamente.


**Tabla 25: Datos térmicos de la prueba realizada con control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones**

			ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				PRUEBA: 1		
			DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO				FECHA: 24-09-09		
			REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO				HORA: 5:50 am		
							ENCARGADO: PROYECTO		
Treferencia: 0°C		CAPACIDAD: 60%		CONTROL: ON-OFF		PERTURBACIONES		SI	
								NO	X
TIEMPO [min]	PRESIONES		MONITOREO DE TEMPERATURAS						
	Psucción [Psi]	Pdescarga [Psi]	Tamb [°C]	Tcomp in [°C]	Tcomp out [°C]	Tvet [°C]	Tevap in [°C]	Tevap out [°C]	Tcuarto [°C]
0	25	130	20,74	8,91	54,36	26,75	-0,02	1,56	8,72
1	24	130	20,24	12,43	53,11	26,00	2,72	4,80	10,84
2	24	130	20,52	10,87	53,80	24,35	1,56	2,31	9,07
3	25	125	19,96	10,47	55,14	23,91	0,01	1,41	8,16
4	25	125	20,09	13,14	52,33	23,63	2,75	3,93	10,25
5	30	100	20,21	10,37	54,58	21,05	0,51	0,60	8,13
6	40	100	19,65	12,15	54,26	21,21	1,07	3,09	9,00
7	39	100	20,18	11,87	52,89	22,39	2,19	2,87	8,94
8	38	100	19,96	9,81	55,35	19,71	-0,27	0,01	7,32
9	30	100	19,65	13,46	52,74	18,96	2,44	4,37	9,84
10	25	100	20,18	10,47	54,23	19,49	1,10	0,82	8,01
11	25	100	19,65	11,00	54,92	18,28	0,29	1,72	8,10
12	25	125	20,05	12,33	51,99	19,34	2,53	3,37	9,38
13	30	125	20,05	8,97	55,29	17,75	-0,02	-0,77	7,29
14	40	100	19,53	12,27	53,98	17,44	1,44	3,40	9,07
15	38	100	20,12	10,87	53,33	19,65	1,78	2,00	8,41
16	35	100	19,65	10,34	55,29	18,12	-0,12	1,13	7,67
17	33	100	19,90	12,93	51,93	18,65	2,75	4,09	9,81
18	32	120	20,09	9,53	54,76	18,12	0,19	-0,15	7,51
19	30	120	19,53	12,12	53,70	18,31	1,22	3,25	8,88
20	25	100	20,05	11,31	52,77	20,18	1,97	2,31	8,47
21	25	100	19,65	10,40	54,05	18,22	-0,27	0,85	7,48
22	25	125	19,77	13,18	50,93	17,75	2,62	4,09	9,72


**Tabla 25: (Continuación)**

		ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				PRUEBA: 1			
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO				FECHA: 24-09-09			
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO				HORA: 5:50 am			
Referencia: 0°C		CAPACIDAD: 60%		CONTROL: ON-OFF		PERTURBACIONES		SI	
								NO	X
TIEMPO [min]	PRESIONES		MONITOREO DE TEMPERATURAS						
	Psucción [Psi]	Pdescarga [Psi]	Tamb [°C]	Tcomp in [°C]	Tcomp out [°C]	Tvet [°C]	Tevap in [°C]	Tevap out [°C]	Tcuarto [°C]
23	30	125	20,05	9,69	54,45	17,91	-0,02	-0,15	7,32
24	40	95	19,53	12,58	52,55	17,66	1,41	3,84	8,94
25	38	95	20,05	11,21	53,27	19,56	1,81	1,81	8,26
26	37	100	19,56	10,87	54,14	18,12	0,07	1,69	7,85
27	35	100	19,90	12,83	51,62	18,84	2,62	3,81	9,44
28	30	135	19,96	9,00	55,29	17,25	-0,02	-0,77	7,04
29	28	135	19,49	12,02	53,39	16,82	1,13	3,15	8,63
30	25	125	20,05	11,28	52,93	19,46	1,94	2,12	8,29
31	25	125	19,56	10,09	54,79	17,75	-0,37	0,66	7,23
32	25	125	19,65	13,18	51,43	17,22	2,56	4,27	9,56
33	30	125	19,96	9,63	54,76	17,78	0,47	-0,37	7,29
34	39	100	19,43	11,49	54,23	16,91	0,66	2,37	8,10
35	38	100	19,96	11,65	52,46	19,12	2,16	2,68	8,63
36	34	110	19,71	9,53	54,98	16,91	-0,65	-0,18	6,92
37	33	110	19,49	13,27	51,74	16,16	2,03	4,37	9,28
38	32	130	19,96	10,19	54,08	18,00	0,97	0,16	7,54
39	35	130	19,31	11,28	54,33	17,13	0,32	1,97	7,85
40	38	100	19,77	12,15	51,87	18,84	2,47	3,40	8,94
41	30	100	19,74	9,53	55,04	17,69	-0,49	-0,33	6,76
42	24	134	19,34	13,24	52,27	17,16	1,94	4,15	9,10
43	34	110	19,93	10,62	54,14	18,59	1,19	0,66	7,57
44	35	100	19,28	11,77	54,58	17,28	0,23	1,97	7,82
45	28	130	19,77	13,08	51,87	18,68	2,56	3,62	9,07
46	34	110	19,87	9,75	55,42	17,60	-0,46	-0,65	6,73
47	24	134	19,37	13,46	52,96	17,16	1,56	3,77	8,82
48	34	100	19,96	11,49	53,89	19,15	1,56	1,35	7,85
49	40	95	19,53	11,37	55,26	17,78	-0,05	1,28	7,39


**Tabla 25: (Continuación)**

		ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				PRUEBA: 1			
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO				FECHA: 24-09-09			
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO				HORA: 5:50 am			
REFERENCIA: 0°C		CAPACIDAD: 60%		CONTROL: ON-OFF		PERTURBACIONES		SI	
								NO	X
TIEMPO [min]	PRESIONES		MONITOREO DE TEMPERATURAS						
	Psucción [Psi]	Pdescarga [Psi]	Tamb [°C]	Tcomp in [°C]	Tcomp out [°C]	Tvet [°C]	Tevap in [°C]	Tevap out [°C]	Tcuarto [°C]
50	24	130	19,81	13,64	51,93	17,94	2,62	3,77	9,28
51	36	100	19,96	10,47	55,60	17,60	-0,46	-0,30	6,82
52	25	125	19,49	13,80	53,18	16,97	1,44	3,74	8,79
53	32	115	20,05	11,84	53,92	19,06	1,56	1,44	7,91
54	40	95	19,56	11,96	55,17	17,60	-0,02	1,41	7,51
55	24	130	19,87	13,95	52,18	17,94	2,59	3,93	9,22
56	38	100	20,05	10,06	56,10	17,32	-0,27	-0,89	6,86
57	25	125	19,53	13,36	53,95	17,22	1,13	3,15	8,44
58	30	125	20,09	12,15	53,77	19,49	1,88	1,94	8,10
59	30	100	19,71	11,28	55,60	17,25	-0,49	0,79	7,17
60	23	130	19,74	14,64	51,96	16,66	2,59	4,40	9,47
61	35	100	20,12	10,75	55,54	17,60	0,23	-0,33	7,20
62	25	120	19,62	13,36	54,30	17,22	0,91	2,87	8,29
63	28	125	20,15	12,96	53,33	19,71	2,12	2,68	8,32
64	39	95	19,84	11,28	55,95	17,84	-0,43	0,29	6,92
65	22	130	19,71	14,95	52,52	17,16	2,31	4,46	9,28
66	35	100	20,15	11,34	55,60	18,12	0,66	-0,05	7,29
67	25	125	19,62	15,07	53,83	17,00	0,82	3,90	8,16
68	44	90	20,24	13,58	53,70	18,19	2,16	2,78	8,51
69	24	130	19,96	11,12	56,44	16,57	-0,61	0,16	6,82
70	35	100	19,74	14,70	53,11	15,91	2,09	4,43	9,22
71	25	125	20,27	11,37	55,48	17,97	1,04	0,16	7,51
72	30	125	19,74	12,33	55,63	17,28	0,32	1,94	7,82
73	38	95	20,21	13,14	53,21	19,00	2,40	3,40	8,82
74	25	125	20,02	10,53	56,13	17,75	-0,49	-0,30	6,76
75	32	100	19,71	14,33	53,27	17,13	2,00	4,21	9,07
76	25	125	20,21	11,53	55,35	18,78	0,94	0,51	7,51

**Tabla 25: (Continuación)**

		ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				PRUEBA: 1			
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO				FECHA: 24-09-09			
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO				HORA: 5:50 am			
				ENCARGADO: PROYECTO					
Referencia: 0°C		CAPACIDAD: 60%		CONTROL: ON-OFF				PERTURBACIONES	
								SI	
								NO	
								X	
TIEMPO [min]	PRESIONES		MONITOREO DE TEMPERATURAS						
	Psucción [Psi]	Pdescarga [Psi]	Tamb [°C]	Tcomp in [°C]	Tcomp out [°C]	Tvet [°C]	Tevap in [°C]	Tevap out [°C]	Tcuarto [°C]
77	32	110	19,59	12,83	55,32	17,60	0,51	2,31	7,91
78	38	90	20,12	13,33	53,42	19,53	2,31	3,25	8,60
79	25	125	19,90	11,21	56,04	17,81	-0,55	0,29	6,89
80	35	100	19,68	14,73	52,68	16,97	2,19	4,55	9,25
81	25	125	20,24	11,06	55,51	18,31	0,57	-0,12	7,29
82	25	125	19,71	12,80	55,17	17,35	0,66	2,47	8,01
83	48	95	20,27	12,71	53,64	19,62	2,12	2,81	8,47
84	24	130	19,99	11,00	56,23	17,66	-0,49	0,23	6,82
85	25	120	19,84	14,48	52,71	16,91	2,25	4,46	9,19
86	30	115	20,33	11,12	55,82	18,22	0,66	-0,15	7,20
87	38	100	19,81	12,58	55,51	17,10	0,32	2,12	7,73
88	25	125	20,30	13,30	53,14	19,03	2,40	3,15	8,72
89	34	100	20,05	10,72	56,32	17,44	-0,55	-0,37	6,70
90	25	120	19,71	14,42	53,27	16,79	1,88	4,21	8,88
91	30	115	20,30	11,71	55,29	18,50	1,22	0,72	7,48
92	37	95	19,71	12,61	55,60	17,28	0,23	1,94	7,57
93	25	125	20,15	13,92	53,02	18,72	2,40	3,40	8,75
94	33	100	20,12	10,81	56,51	17,25	-0,58	-0,68	6,54
95	33	100	19,68	14,48	53,74	16,57	1,56	3,77	8,66
96	25	125	20,30	12,37	54,98	18,72	1,44	1,04	7,54
97	36	100	19,74	12,43	56,10	17,13	-0,12	1,35	7,29
98	25	125	20,05	14,48	52,49	17,47	2,53	3,90	9,10
99	30	115	20,27	10,90	56,44	17,28	-0,43	-0,99	6,61
100	40	95	19,74	14,42	54,20	16,29	1,25	3,37	8,35
101	22	130	20,33	12,96	54,54	19,12	1,72	1,72	7,79
102	35	100	19,90	12,37	56,13	17,22	-0,21	0,91	7,07
103	25	125	20,02	14,98	52,52	16,85	2,62	4,09	9,10

**Tabla 25: (Continuación)**

		ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				PRUEBA: 1			
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO				FECHA: 24-09-09			
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO				HORA: 5:50 am			
		ENCARGADO: PROYECTO							
Treferencia: 0°C		CAPACIDAD: 60%		CONTROL: ON-OFF		PERTURBACIONES		SI	
								NO	X
TIEMPO [min]	PRESIONES		MONITOREO DE TEMPERATURAS						
	Psucción [Psi]	Pdescarga [Psi]	Tamb [°C]	Tcomp in [°C]	Tcomp out [°C]	Tvet [°C]	Tevap in [°C]	Tevap out [°C]	Tcuarto [°C]
104	30	115	20,40	11,06	56,44	17,28	-0,33	-1,05	6,70
105	39	95	19,87	14,26	54,48	16,47	0,97	3,03	8,10
106	25	125	20,46	13,36	53,83	19,25	1,97	2,25	8,04
107	34	100	20,02	12,05	55,98	16,75	-0,49	0,44	6,82
108	25	125	19,93	15,48	52,15	15,95	2,37	4,27	9,07
109	28	125	20,49	11,28	55,79	17,28	0,07	-0,83	6,86
110	39	100	19,84	13,74	54,73	16,47	0,60	2,47	7,73
111	25	125	20,40	13,67	53,39	19,00	2,12	2,59	8,16
112	35	100	20,09	11,96	56,10	16,91	-0,58	0,23	6,70
113	25	125	19,93	15,67	52,46	16,07	2,25	4,43	8,94
114	28	130	20,52	11,68	55,82	17,66	0,41	-0,55	6,92
115	39	100	19,96	13,83	55,04	16,63	0,63	2,47	7,79
116	25	125	20,55	13,92	53,39	19,15	2,19	2,68	8,29
117	34	105	20,27	11,56	56,44	17,22	-0,65	-0,18	6,54
118	25	120	19,96	15,42	53,33	16,57	1,97	4,27	8,82
119	30	115	20,61	12,02	55,70	18,16	0,79	0,04	7,17
120	32	100	19,99	13,36	55,35	16,63	0,35	2,25	7,63

**Tabla 26: Datos eléctricos de la prueba realizada con control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones**


		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA								PRUEBA: 1					
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO								FECHA: 24-09-09					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								HORA: 5:50 am					
		CAPACIDAD: 60%								CONTROL: ON-OFF		PERTURBACIONES		SI	
Treferencia: 0 °C												NO	X		
Tiempo [min]	LINEAS COMPRESOR												COMSUMO DEL SISTEMA		
	LINEA 1				LINEA 2				LINEA 3				LINEA 1	LINEA 2	LINEA3
	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	I [Amp]	I [Amp]	I [Amp]
0													1,8	1,8	8,1
1	129,6	4,3	0,36	0,646	127	4,3	0,35	0,641	127,2	4,3	0,36	0,658	5,6	5,3	12,2
2	129,9	4,3	0,37	0,662	126,2	4,3	0,35	0,645	128	4,3	0,36	0,654	5,6	5,3	12,2
3													1,8	1,8	8,1
4	128,7	4,4	0,36	0,636	128,6	4,3	0,34	0,615	128,3	4,3	0,35	0,634	5,6	5,3	12,2
5	130,5	4,2	0,34	0,620	128,6	4,6	0,34	0,575	128,3	4,3	0,35	0,634	5,6	5,3	12,2
6													1,8	1,8	8,1
7	131,9	4,1	0,37	0,684	128,9	4,3	0,34	0,613	130	4,3	0,35	0,626	5,6	5,3	12,2
8													1,8	1,8	8,3
9	131,1	4,1	0,35	0,651	128,5	4,3	0,34	0,615	130	4,3	0,35	0,626	5,6	5,3	12,2
10	131,1	4,1	0,36	0,670	128,5	4,3	0,35	0,633	130	4,3	0,35	0,626	5,6	5,3	12,2
11													1,8	1,8	8,3
12	131	4,1	0,36	0,670	128,5	4,3	0,35	0,633	130	4,3	0,35	0,626	5,6	5,3	12,2
13													1,8	1,8	8,1
14													1,8	1,8	8,1
15	131,1	4,4	0,37	0,641	128,3	4,4	0,34	0,602	130,1	4,4	0,35	0,611	5,6	5,3	12,2
16													1,8	1,8	8,1
17	130,9	4,2	0,35	0,637	128,3	4,5	0,36	0,624	124,9	4,4	0,36	0,655	5,6	5,3	12,2
18	130,9	4,2	0,35	0,637	128,1	4,4	0,35	0,621	130,2	4,4	0,36	0,628	5,6	5,3	12,2
19													1,8	1,8	8,1
20	130,8	4,3	0,36	0,640	127,9	4,4	0,35	0,622	129,5	4,4	0,35	0,614	5,6	5,3	12,2
21													1,8	1,8	8,1
22	130,6	4,1	0,35	0,654	128,4	4,4	0,35	0,620	129,5	4,3	0,35	0,629	5,6	5,3	12,2
23													1,8	1,8	8,1
24													1,8	1,8	8,1
25	130,9	4,4	0,36	0,625	127,8	4,4	0,35	0,631	129,5	4,3	0,35	0,629	5,6	5,3	12,2
26													1,8	1,8	8,1

Tabla 26: (Continuación)


		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA								PRUEBA: 1					
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO								FECHA: 24-09-09					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								HORA: 5:50 am					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								ENCARGADO: PROYECTO					
Treferencia: 0 °C		CAPACIDAD: 60%				CONTROL: ON-OFF				PERTURBACIONES		SI			
												NO	X		
Tiempo [min]	LINEAS COMPRESOR												COMSUMO DEL SISTEMA		
	LINEA 1				LINEA 2				LINEA 3				LINEA 1	LINEA 2	LINEA3
	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	I [Amp]	I [Amp]	I [Amp]
27	130,9	4,4	0,36	0,625	127,8	4,4	0,36	0,651	129,5	4,3	0,35	0,629	5,6	5,3	12,2
28													1,8	1,8	8,1
29													1,8	1,8	8,1
30	130,3	4,1	0,36	0,674	127,8	4,4	0,35	0,650	129	4,2	0,35	0,646	5,6	5,3	12,2
31													1,8	1,8	8,1
32	130	4,2	0,35	0,641	127,1	4,2	0,34	0,637	129	4,2	0,34	0,628	5,6	5,3	12,2
33	130	4,2	0,35	0,641	127,1	4,2	0,34	0,637	129	4,2	0,34	0,628	5,6	5,3	12,2
34													1,8	1,8	8,1
35	129,7	4,1	0,34	0,639	126,6	4,3	0,35	0,643	128,5	4,3	0,35	0,633	5,6	5,3	12,2
36													1,8	1,8	8,1
37	129,7	4,2	0,34	0,624	126,5	4,2	0,34	0,640	128	4,4	0,36	0,639	5,6	5,3	12,2
38	129,7	4,2	0,34	0,624	126,5	4,2	0,34	0,640	128	4,4	0,36	0,639	5,6	5,3	12,2
39													1,8	1,8	8,1
40	129,3	4,2	0,35	0,644	126,1	4,3	0,35	0,645	127,4	4,3	0,35	0,639	5,6	5,3	12,2
41													1,8	1,8	8,1
42													1,8	1,8	8,1
43	129,2	4,2	0,35	0,645	126,4	4,3	0,35	0,644	127,8	4,3	0,35	0,637	5,6	5,3	12,2
44													1,8	1,8	8,1
45	128,8	4,1	0,33	0,625	125,8	4,2	0,33	0,660	127,2	4,3	0,35	0,640	5,6	5,3	12,2
46													1,8	1,8	8,1
47													1,8	1,8	8,1
48	128,7	4,3	0,35	0,632	126,1	4,3	0,35	0,658	127,4	4,3	0,35	0,639	5,6	5,3	12,2
49													1,8	1,8	8,1
50	129,1	4,3	0,35	0,630	126,3	4,2	0,35	0,645	127,6	4,3	0,35	0,638	5,6	5,3	12,2
51													1,8	1,8	8,1
52													1,8	1,8	8,1
53	129	4,1	0,34	0,643	126,6	4,3	0,35	0,663	127,6	4,2	0,34	0,634	5,6	5,3	12,2

Tabla 26: (Continuación)


		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA								PRUEBA: 1					
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO								FECHA: 24-09-09					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								HORA: 5:50 am					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								ENCARGADO: PROYECTO					
Treferencia: 0 °C		CAPACIDAD: 60%				CONTROL: ON-OFF				PERTURBACIONES		SI			
		NO		X											
Tiempo [min]	LINEAS COMPRESOR												COMSUMO DEL SISTEMA		
	LINEA 1				LINEA 2				LINEA 3				LINEA 1	LINEA 2	LINEA3
	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	I [Amp]	I [Amp]	I [Amp]
54													1,8	1,8	8,1
55	128,9	4,1	0,34	0,643	126,6	4,3	0,35	0,663	127,6	4,2	0,34	0,634	5,6	5,3	12,2
56													1,8	1,8	8,1
57													1,8	1,8	8,1
58	128,5	4,2	0,35	0,649	126,1	4,3	0,35	0,640	127,4	4,4	0,36	0,642	5,6	5,3	12,2
59													1,8	1,8	8,1
60	128,4	4,2	0,35	0,649	125,7	4,2	0,34	0,676	127	4,4	0,36	0,644	5,6	5,3	12,2
61	128,1	4,2	0,35	0,651	125,4	4,2	0,34	0,676	127	4,4	0,36	0,644	5,6	5,3	12,2
62													1,8	1,8	8,1
63	127,6	4,2	0,34	0,634	124,8	4,3	0,34	0,675	126,6	4,3	0,35	0,643	5,6	5,3	12,2
64													1,8	1,8	8,1
65	129	4,2	0,34	0,628	125,5	4,2	0,34	0,646	127	4,2	0,34	0,637	5,6	5,3	12,2
66	127,9	4,2	0,34	0,633	125,5	4,2	0,34	0,646	127,2	4,3	0,35	0,640	5,6	5,3	12,2
67													1,8	1,8	8,1
68	128,4	4	0,34	0,662	125,4	4,2	0,35	0,670	126,8	4,3	0,35	0,642	5,6	5,3	12,2
69													1,8	1,8	8,1
70	127,9	4,2	0,34	0,633	125	4,2	0,34	0,682	126,6	4,3	0,35	0,643	5,6	5,3	12,2
71	127,3	4,2	0,34	0,636	129,8	4,3	0,35	0,680	126,1	4,3	0,35	0,645	5,6	5,3	12,2
72													1,8	1,8	8,1
73	126,9	4,2	0,34	0,638	124,5	4,3	0,35	0,676	125,3	4,3	0,35	0,650	5,6	5,3	12,2
74													1,8	1,8	8,1
75													1,8	1,8	8,1
76	126,4	4,2	0,34	0,640	123,8	4,2	0,35	0,680	126	4,2	0,34	0,642	5,6	5,3	12,2
77													1,8	1,8	8,1
78	125,9	4,2	0,34	0,643	123,4	4,3	0,35	0,697	124,3	4,2	0,34	0,651	5,6	5,3	12,2
79													1,8	1,8	8,1

Tabla 26: (Continuación)



		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA								PRUEBA: 1					
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO								FECHA: 24-09-09					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								HORA: 5:50 am					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								ENCARGADO: PROYECTO					
Treferencia: 0 °C		CAPACIDAD: 60%				CONTROL: ON-OFF				PERTURBACIONES		SI			
		NO		X											
Tiempo [min]	LINEAS COMPRESOR												COMSUMO DEL SISTEMA		
	LINEA 1				LINEA 2				LINEA 3				LINEA 1	LINEA 2	LINEA3
	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	I [Amp]	I [Amp]	I [Amp]
80	124,9	4,2	0,34	0,648	122,6	4,2	0,34	0,690	123,4	4,1	0,34	0,672	5,6	5,3	12,2
81	124,8	4,2	0,34	0,649	122,1	4,2	0,35	0,696	123,1	4,2	0,35	0,677	5,6	5,3	12,2
82													1,8	1,8	8,1
83	124,2	4,2	0,34	0,652	122	4,3	0,35	0,690	122,7	4,1	0,34	0,676	5,6	5,3	12,2
84													1,8	1,8	8,1
85	123,7	4,2	0,34	0,654	121,4	4,3	0,35	0,704	122	4,1	0,34	0,680	5,6	5,3	12,2
86	123,7	4,2	0,34	0,654	121,4	4,3	0,35	0,704	122	4,1	0,34	0,680	5,6	5,3	12,2
87													1,8	1,8	8,1
88	123,9	4,2	0,34	0,653	122,1	4,4	0,35	0,685	122,2	4,1	0,33	0,659	5,6	5,3	12,2
89													1,8	1,8	8,1
90													1,8	1,8	8,1
91	124,2	4,2	0,34	0,652	122,5	4,3	0,36	0,684	123,3	4,2	0,35	0,676	5,6	5,3	12,2
92													1,8	1,8	8,1
93	124,2	4,2	0,34	0,652	122,5	4,3	0,36	0,684	123,3	4,2	0,35	0,676	5,6	5,3	12,2
94													1,8	1,8	8,1
95													1,8	1,8	8,1
96	126,9	4,2	0,34	0,638	125,6	4,5	0,37	0,658	125,8	4,1	0,33	0,640	5,6	5,3	12,2
97													1,8	1,8	8,1
98	126,9	4,2	0,34	0,638	125,6	4,5	0,37	0,658	125,8	4,1	0,33	0,640	5,6	5,3	12,2
99													1,8	1,8	8,1
100													1,8	1,8	8,1
101	127,3	4,2	0,34	0,636	125,9	4,4	0,37	0,667	125,9	4,2	0,35	0,662	5,6	5,3	12,2
102													1,8	1,8	8,1
103	128,7	4,2	0,34	0,629	126,1	4,3	0,35	0,658	127,2	4,3	0,36	0,658	5,6	5,3	12,2
104													1,8	1,8	8,1
105													1,8	1,8	8,1

Tabla 26: (Continuación)

		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA								PRUEBA: 1					
		DETERMINACION DEL CONSUMO ENERGETICO DEL CUARTO FRIO								FECHA: 24-09-09					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								HORA: 5:50 am					
		REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO								ENCARGADO: PROYECTO					
Treferencia: 0 °C		CAPACIDAD: 60%				CONTROL: ON-OFF				PERTURBACIONES		SI			
												NO	X		
Tiempo [min]	LINEAS COMPRESOR												COMSUMO DEL SISTEMA		
	LINEA 1				LINEA 2				LINEA 3				LINEA 1	LINEA 2	LINEA 3
	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	V [Volt]	I [Amp]	P [Kw]	Φ	I [Amp]	I [Amp]	I [Amp]
106	128,5	4,2	0,34	0,630	125,7	4,2	0,34	0,676	127,4	4,2	0,35	0,654	5,6	5,3	12,2
107													1,8	1,8	8,1
108	127,9	4,2	0,34	0,633	125,5	4,2	0,34	0,646	126,6	4,3	0,35	0,643	5,6	5,3	12,2
109	127,9	4,2	0,34	0,633	125,5	4,2	0,34	0,646	126,6	4,3	0,35	0,643	5,6	5,3	12,2
110													1,8	1,8	8,1
111	128,3	4,2	0,34	0,631	126,6	4,3	0,35	0,672	128,5	4,3	0,35	0,633	5,6	5,3	12,2
112													1,8	1,8	8,1
113	130,8	4,2	0,34	0,619	127,9	4,4	0,35	0,631	130,2	4,4	0,36	0,628	5,6	5,3	12,2
114	130,8	4,2	0,34	0,619	127,9	4,4	0,35	0,631	130,2	4,4	0,36	0,628	5,6	5,3	12,2
115													1,8	1,8	8,1
116	128,4	4,2	0,34	0,630	125,6	4,2	0,34	0,676	126,1	4,3	0,35	0,645	5,6	5,3	12,2
117													1,8	1,8	8,1
118													1,8	1,8	8,1
119	126,1	4,2	0,34	0,642	125,7	4,2	0,34	0,676	125,5	4,2	0,34	0,645	5,6	5,3	12,2
120													1,8	1,8	8,1

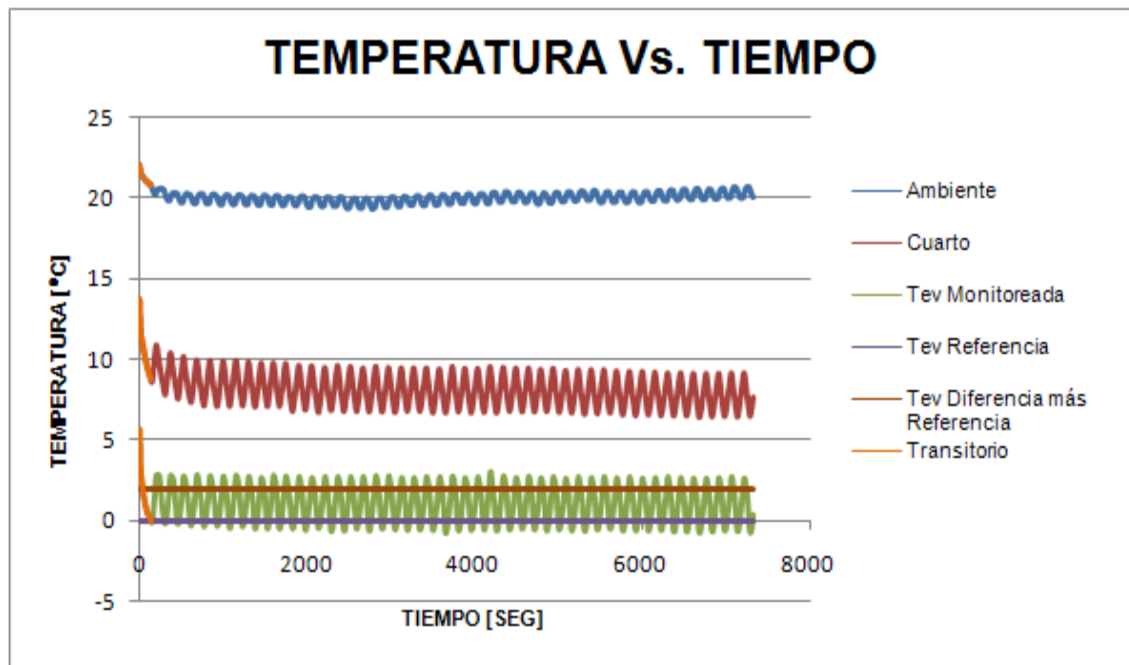
### 5.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

Durante el desarrollo de las 20 pruebas realizadas se generaron varios datos que a continuación se presentaran en forma grafica.

#### 5.3.1 Prueba 1: Control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones

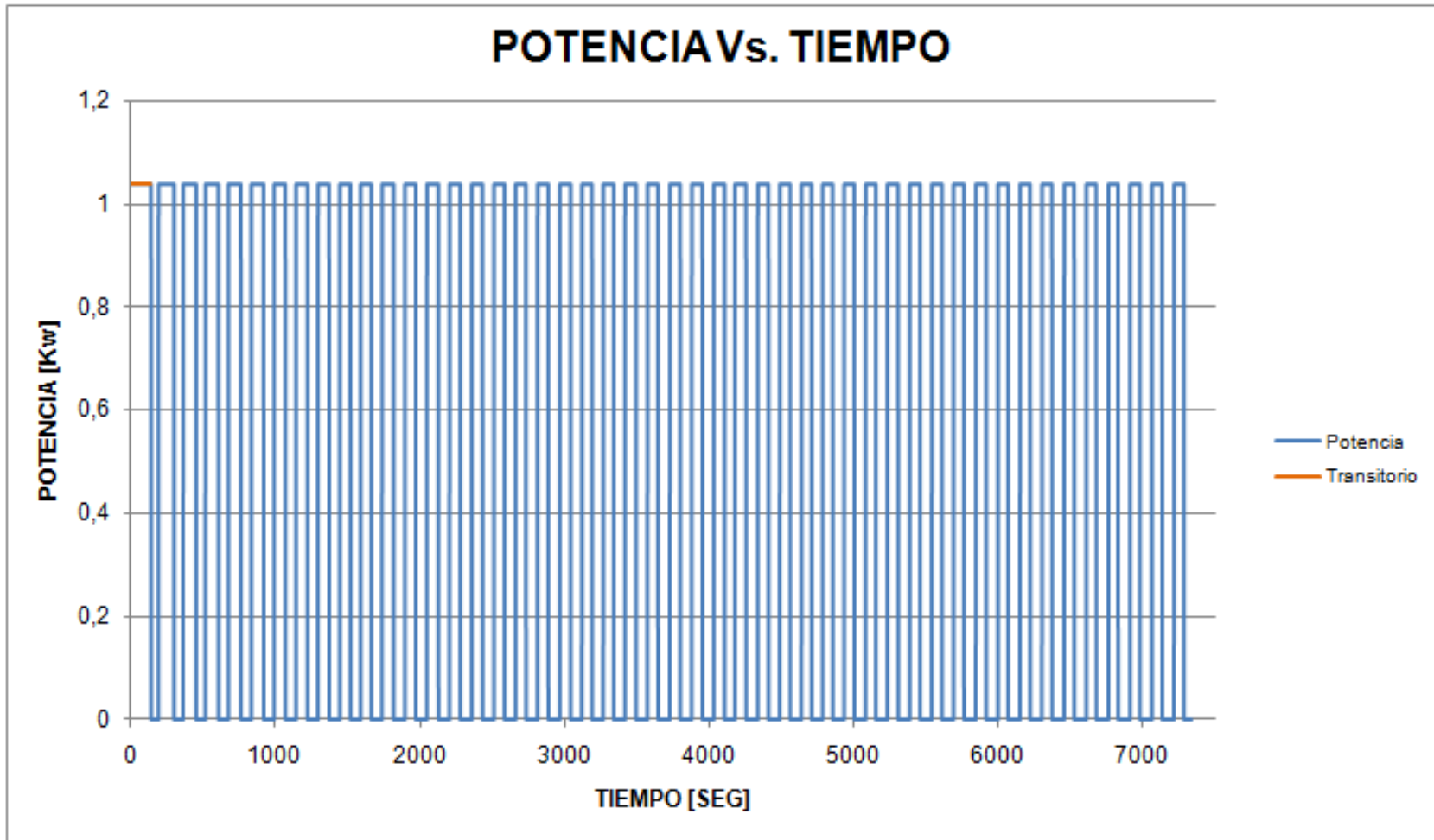
En la figura 76 se puede observar que la temperatura ambiente durante el desarrollo de la prueba tuvo un valor constante, de aproximadamente 21°C.

**Figura 76: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones**



En la figura 77 se puede ver los ciclos de operación del compresor permaneciendo 47 veces prendido y 48 apagado, los tiempos de encendido del compresor son en promedio iguales a 74 segundos. Durante los tiempos de encendido del compresor se midió una potencia activa igual a 1.04Kw.

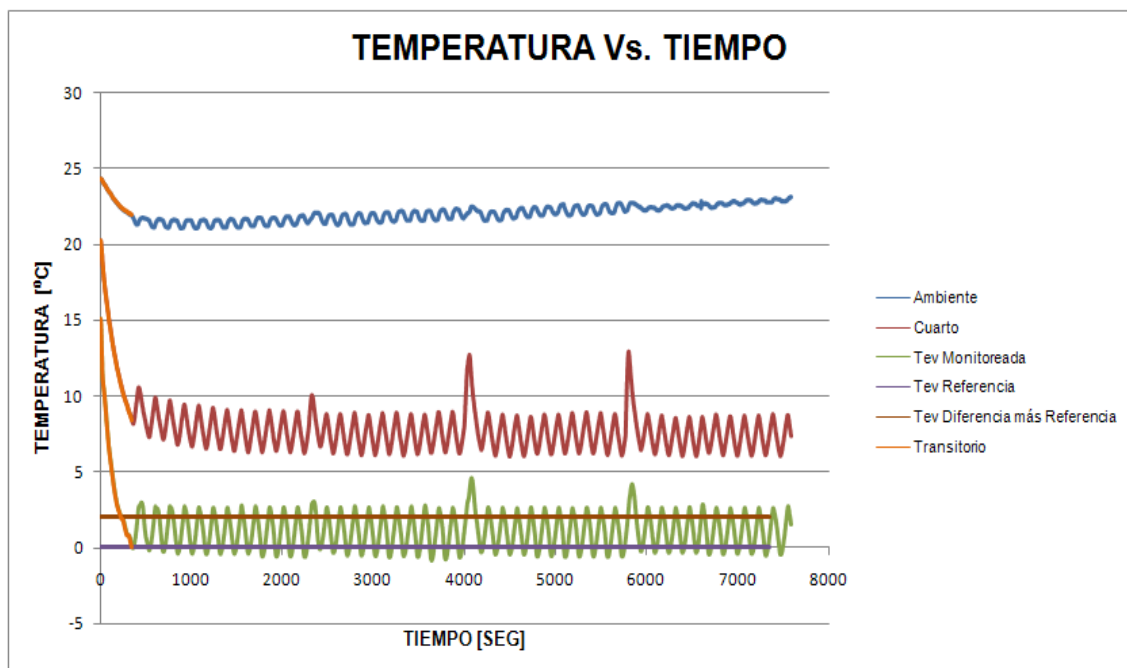
Figura 77: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 60% a 0°C sin perturbaciones



### 5.3.2 Prueba 2: Control ON-OFF 60% a 0°C con perturbaciones

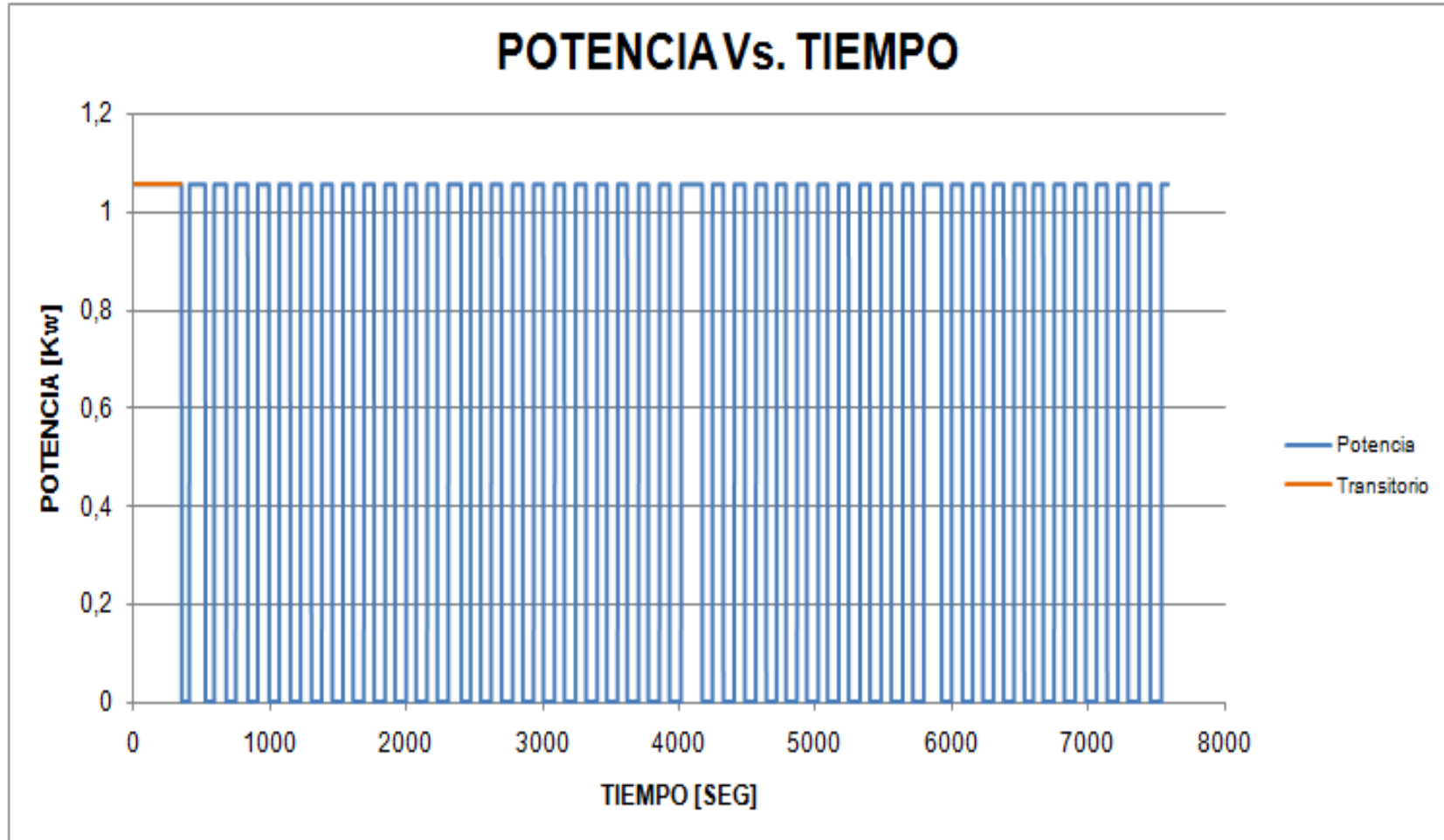
En la figura 78 se puede ver las crestas que se generan producto de las perturbaciones impuestas, las más notorias son las dos últimas debido a que en el momento de abrir la puerta el compresor estaba apagado. Al igual se puede observar que al variar la temperatura de vaporación automáticamente cambia la temperatura del cuarto, presentando ambas el mismo comportamiento.

**Figura 78: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 60% a 0°C con perturbaciones**



En la figura 79 se presentan los ciclos de encendido (46) y apagado (46) del compresor. El tiempo que permanece prendido el compresor es en promedio de 73 segundos consumiendo una potencia de 1.08 Kw. Se puede observar que el compresor tiene que permanecer más tiempo encendido cuando se genera la perturbación pasando de 73 a 130 segundos de encendido.

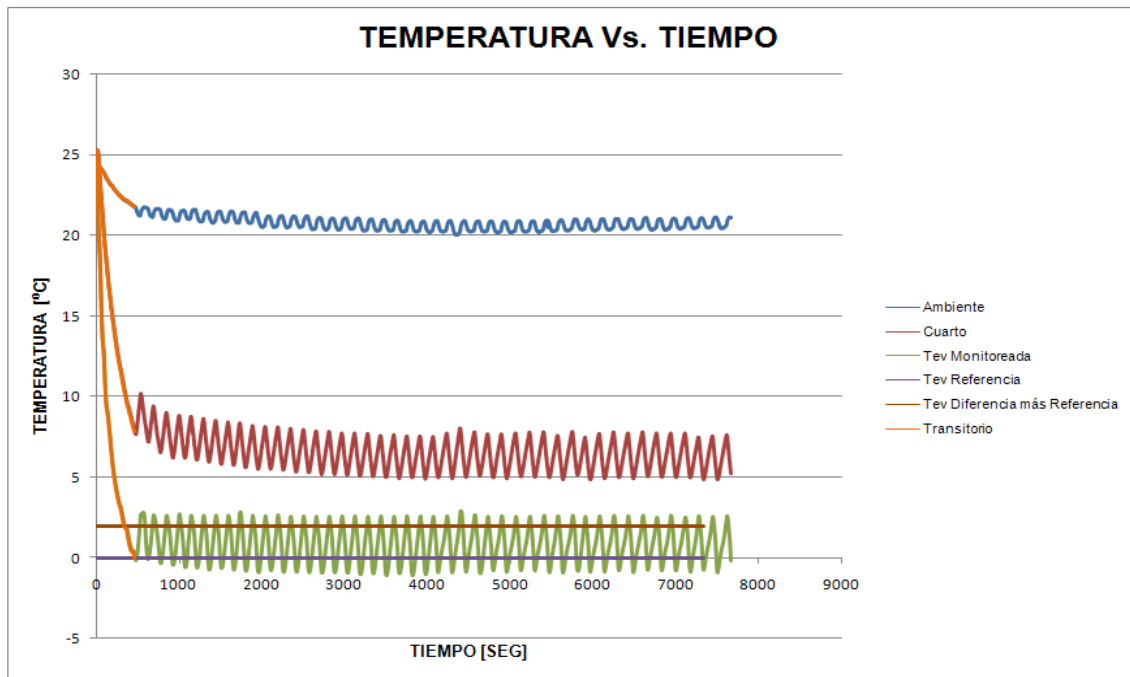
Figura 79: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 60% a 0°C con perturbaciones



### 5.3.3 Prueba 3: Control ON-OFF 20% a 0°C sin perturbaciones

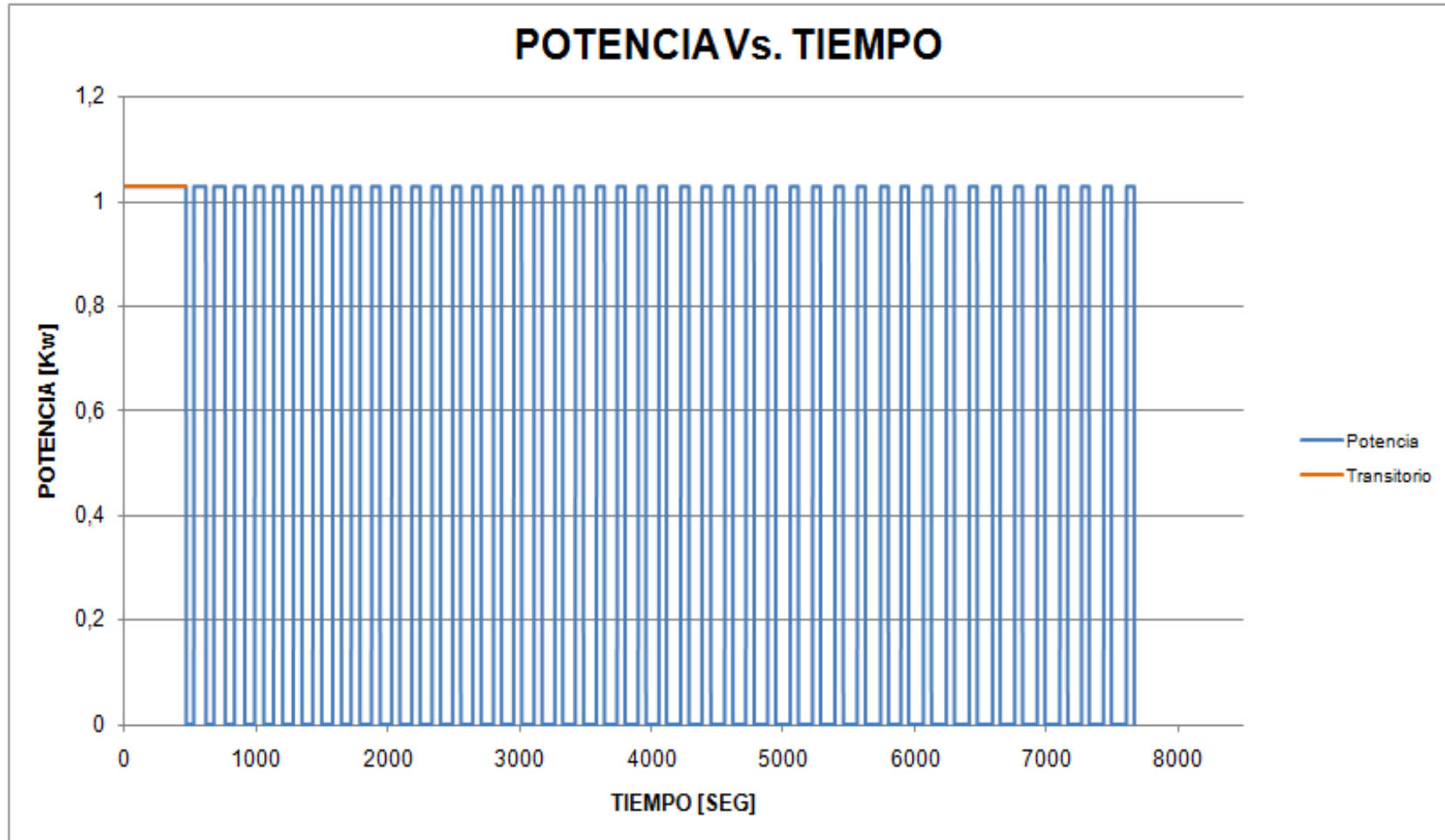
En la figura 80 podemos ver que el transitorio (tiempo que se tarda en alcanzar la temperatura de vaporación de referencia) es menor al generado en las anteriores pruebas debido a que se tiene menor carga.

**Figura 80: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 20% a 0°C sin perturbaciones**



Producto de la menor carga impuesta el compresor permanece prendido 45 veces pero con tiempo pequeños aproximadamente de 60 segundos, consumiendo una potencia de 1.03 Kw. El tiempo de las veces que permanece apagado (46) es mayor a 60 segundos pues el sistema se demora más tiempo subiendo de 0°C a 2°C, que retornando de 2°C a 0°C con ayuda del compresor, como se puede observar en la figura 81.

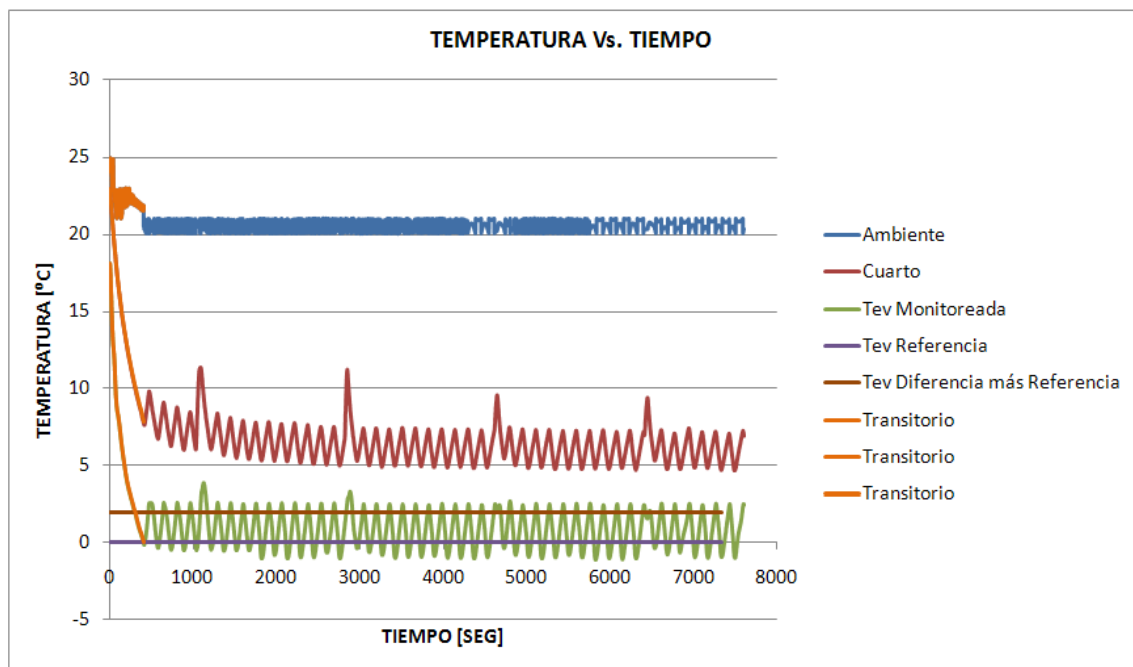
Figura 81: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 20% a 0°C sin perturbaciones



### 5.3.4 Prueba 4: Control ON-OFF 20% a 0°C con perturbaciones

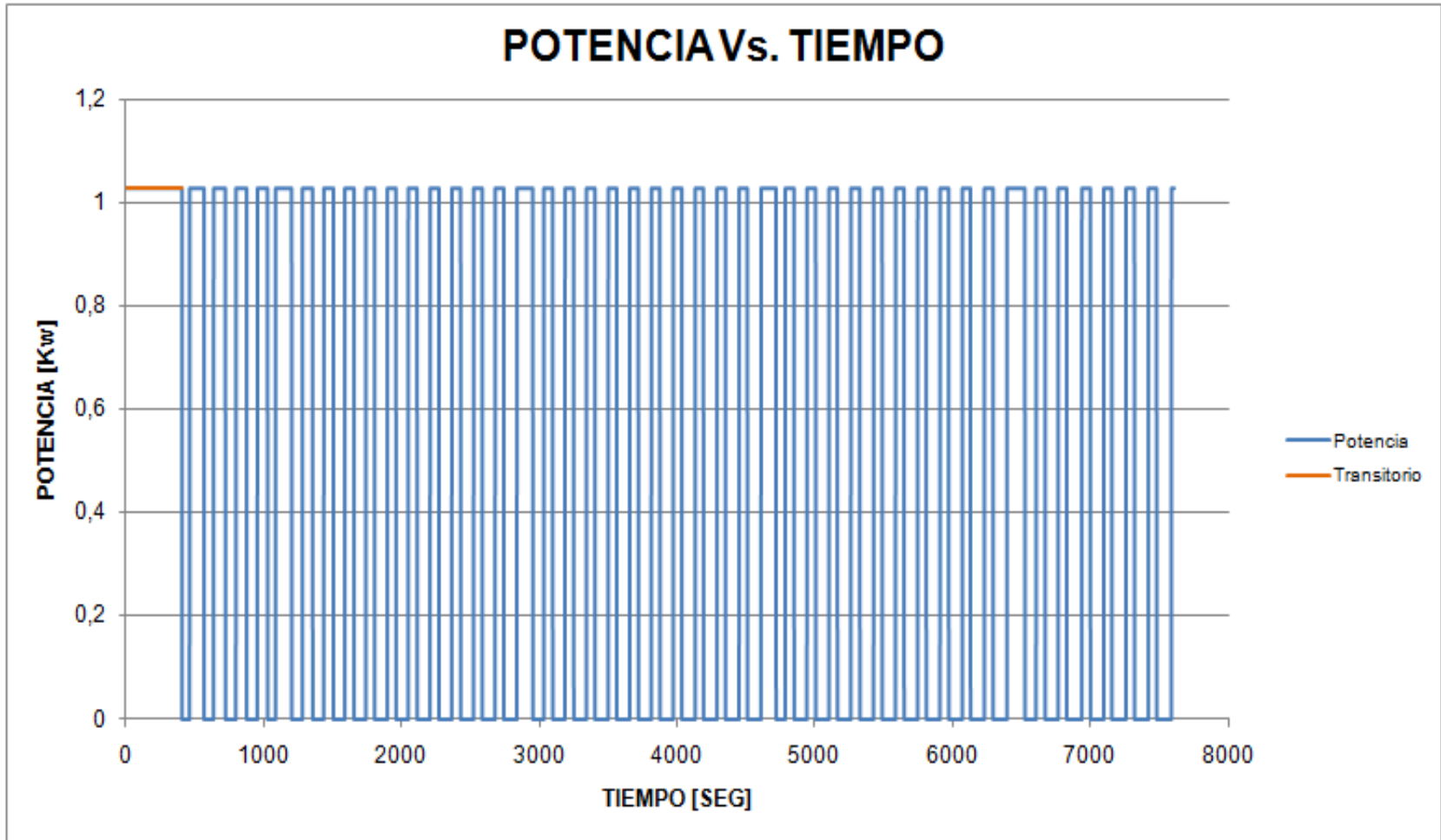
En la figura 82 se puede observar como el pico de la oscilación producida por las dos últimas perturbaciones es amortiguada debido a que la apertura de la puerta se dio en el momento en que el compresor se encontraba prendido.

**Figura 82: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 20% a 0°C con perturbaciones**



En la figura 83 se puede observar las 45 veces que permaneció el compresor prendido y apagado. En esta prueba se pasa de 62 a 116 segundos el tiempo de encendido del compresor en el momento de las perturbaciones. La potencia promedio consumida por el compresor para esta prueba es de 1,03 Kw.

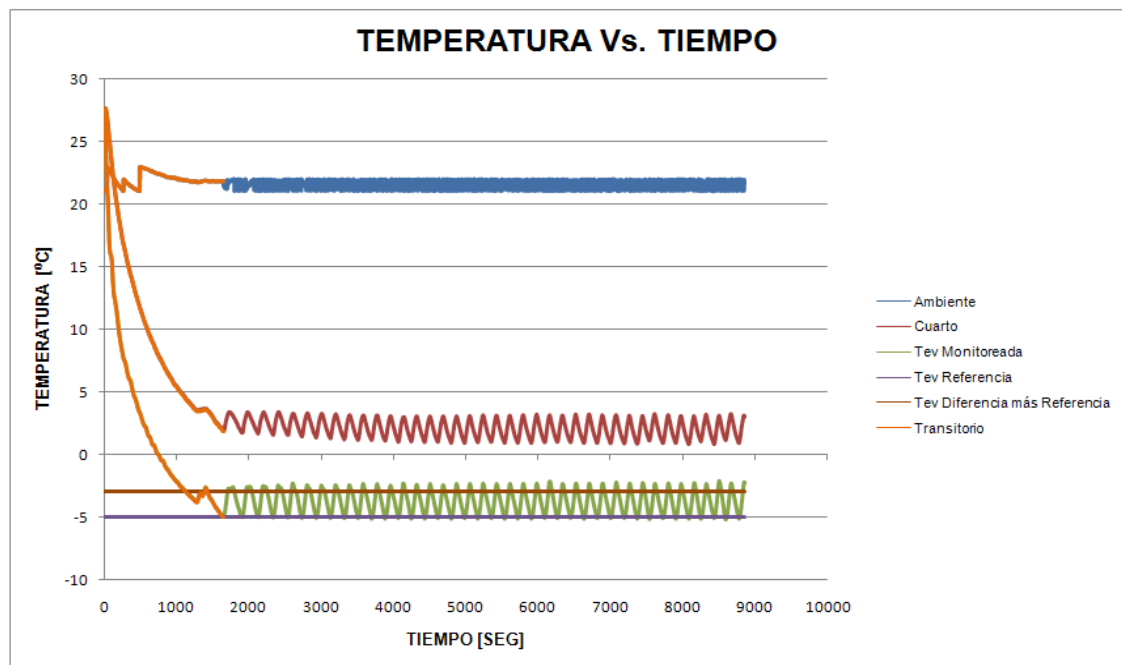
Figura 83: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 20% a 0°C con perturbaciones



### 5.3.5 Prueba 5: Control ON-OFF 60% a -5°C sin perturbaciones

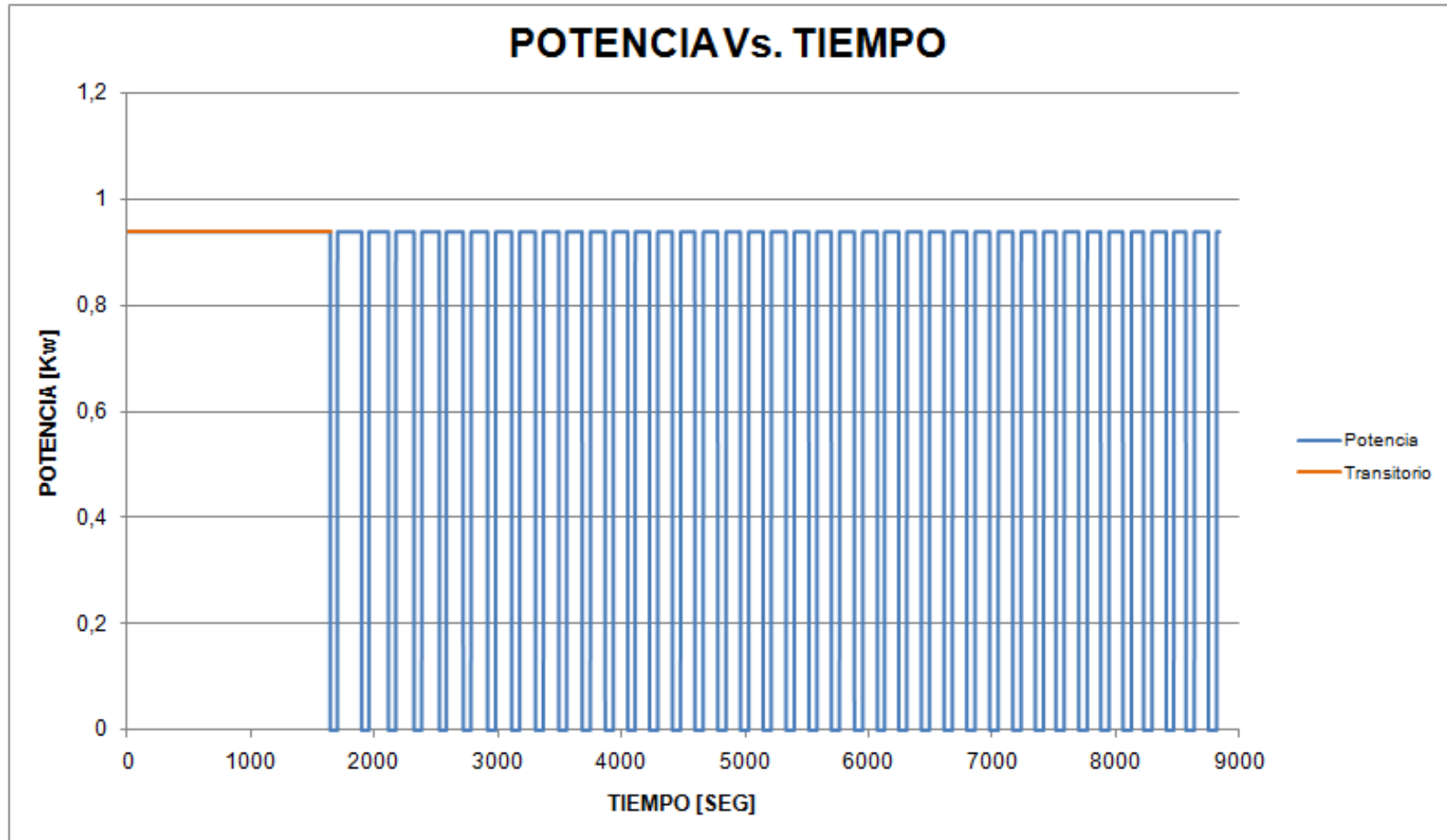
Como se puede observar en la figura 84 en esta prueba el comportamiento de la temperatura ambiente fue muy uniforme con un valor de 21°C. Al igual se ve la oscilación de la temperatura de vaporación en el rango de operación entre -5°C y -3°C lo que ocasiona el mismo comportamiento en la temperatura del cuarto frío.

**Figura 84: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 60% a -5°C sin perturbaciones**



Por otro lado se puede ver en la figura 85 que los ciclos de encendido del compresor fueron menores a los de la prueba 1 pero manejaron tiempos más largos, estando encendido 120 segundos durante cada una de las 39 veces que permaneció prendido. El aumento del tiempo se debe a que la temperatura de vaporación de estudio ya no era 0°C sino -5°C y el compresor permanece más tiempo encendido cuando tiene que trabajar con temperaturas de vaporación más bajas. El consumo de potencia en esta prueba fue en promedio de 0.94 Kw.

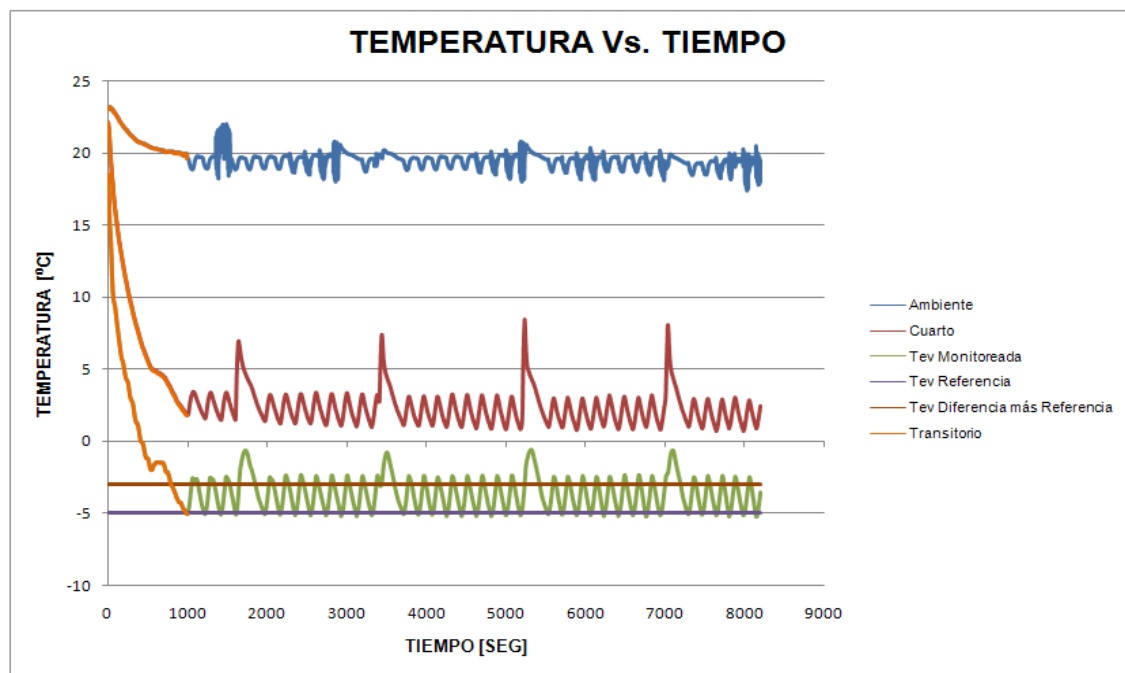
Figura 85: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 60% a -5°C sin perturbaciones



### 5.3.6 Prueba 6: Control ON-OFF 60% a -5°C con perturbaciones

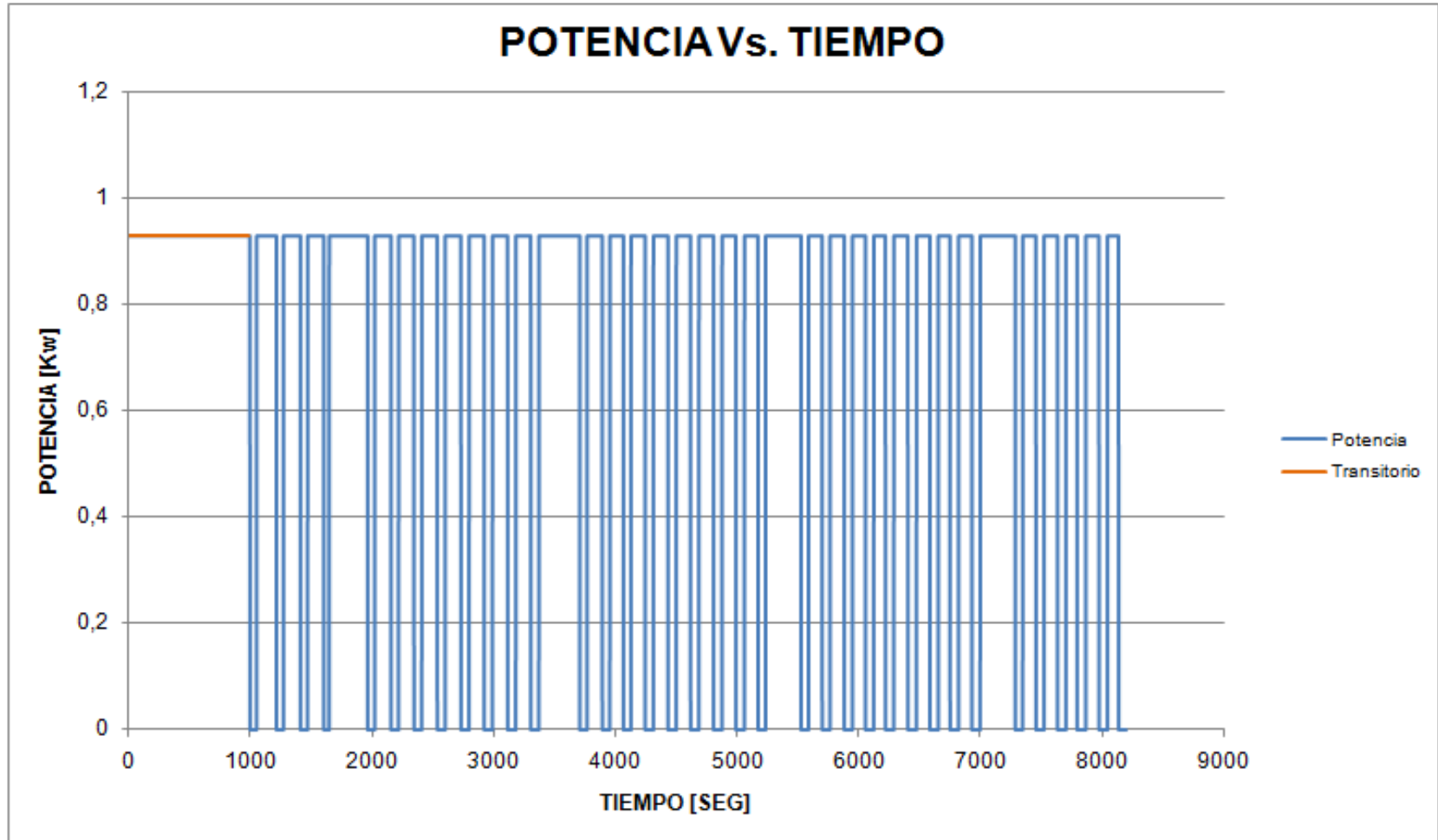
En la figura 86 se muestran las cuatro perturbaciones impuestas al sistema con unos picos que son más prolongados en la temperatura del cuarto que en la temperatura de vaporación. En la segunda perturbación se observa dos picos, el pico pequeño se debe a la carga imprevista que recibe el compresor cuando viene bajando de -5°C a 0°C, generando un aumento súbito de la temperatura de vaporación.

**Figura 86: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 60% a -5°C con perturbaciones**



En la figura 87 se puede ver que la perturbación 2 genera más tiempo de encendido (315 seg) del compresor que las otras tres (300 seg). El compresor permaneció prendido 36 veces durante el desarrollo de la prueba consumiendo una potencia de 0.93 Kw.

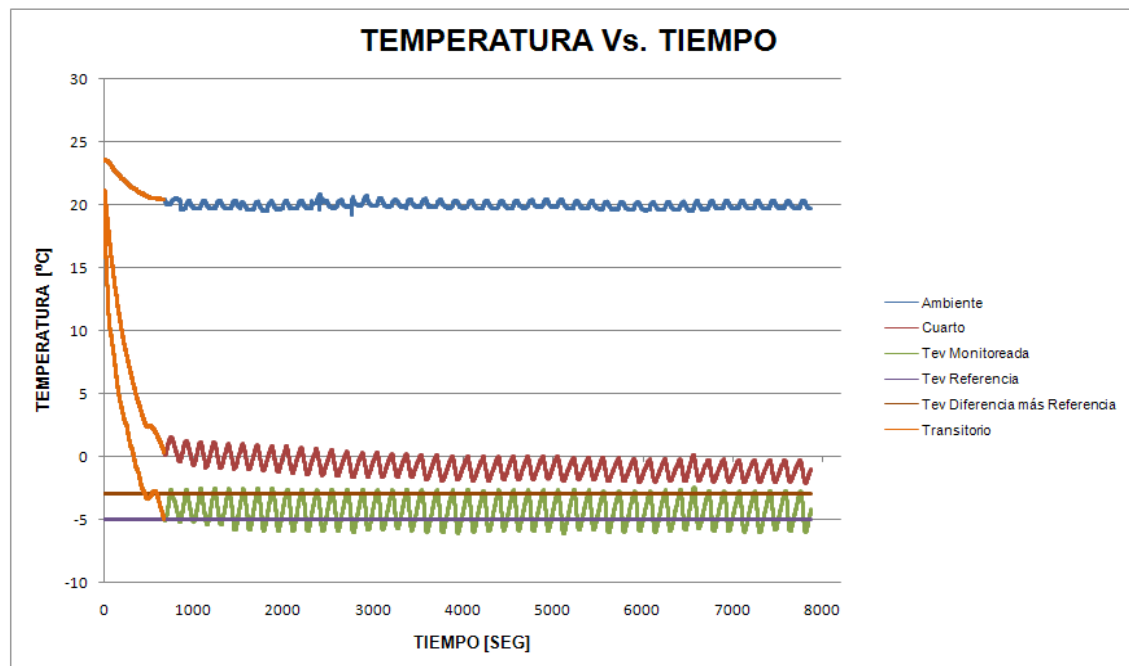
Figura 87: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 60% a -5°C con perturbaciones



### 5.3.7 Prueba 7: Control ON-OFF 20% a -5°C sin perturbaciones

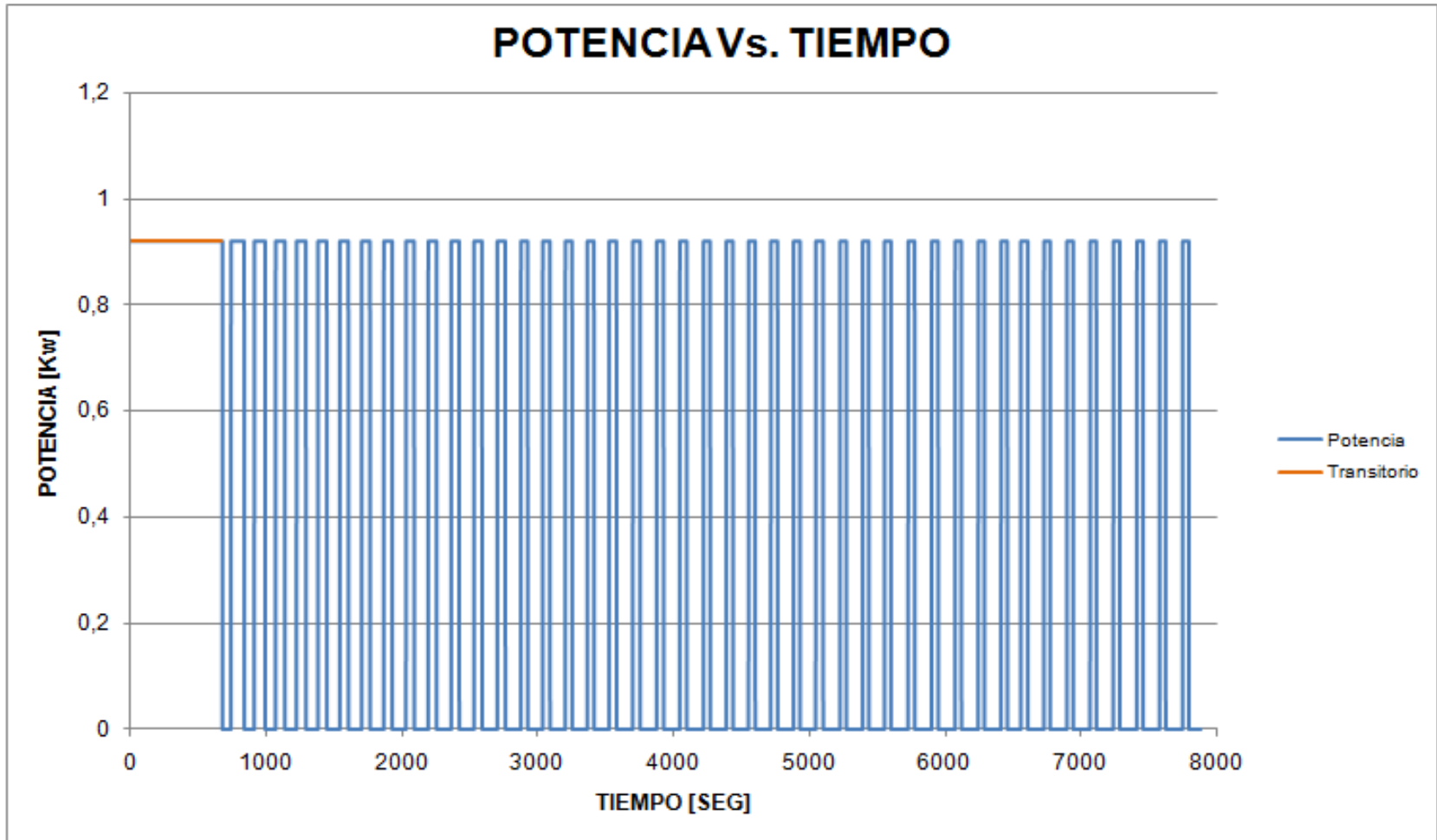
En la figura 88 se puede ver como el delta entre las temperaturas del cuarto y la de evaporación que había permanecido constante después de una hora de prueba empieza a disminuir debido a que la carga impuesta al sistema es muy pequeña y con el tiempo tiende a no subir la temperatura del cuarto cuando el compresor permanece apagado ya que estos tiempos son pequeños.

**Figura 88: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 20% a -5°C sin perturbaciones**



En la figura 89 se puede observar las 49 veces que el compresor permaneció encendido con tiempos muy cortos de 45 segundos y las 44 veces que permaneció apagado con tiempos un poco mayor a los de encendido de 120 segundos. El consumo de potencia del compresor cuando estuvo prendido fue de 0.92 Kw.

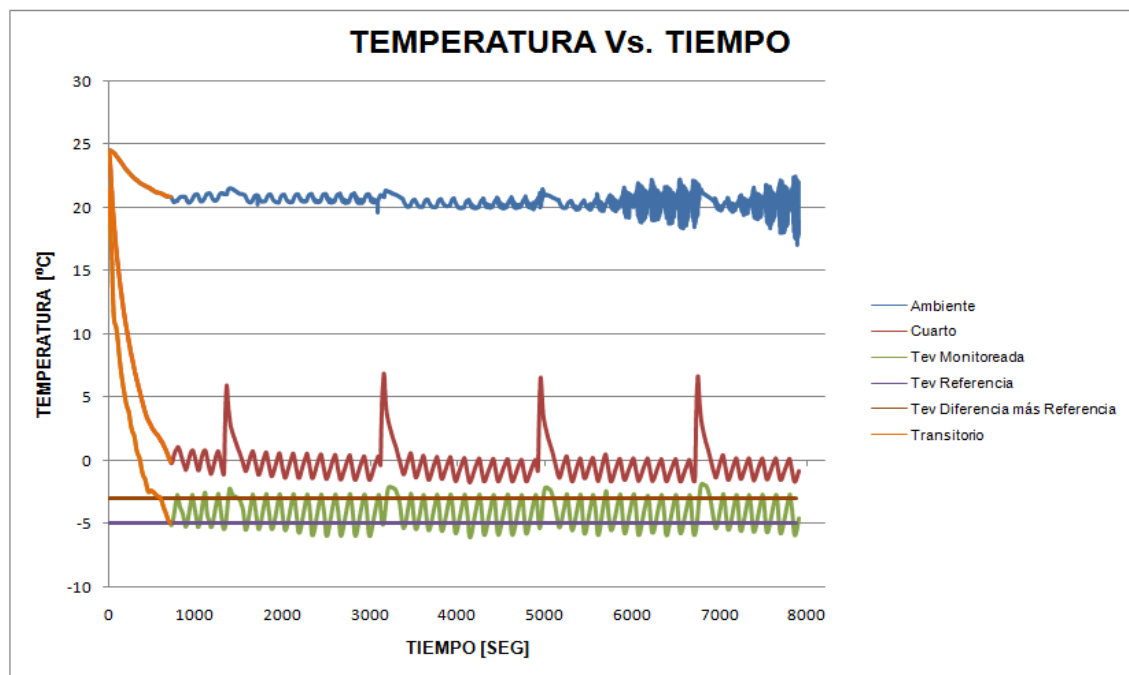
Figura 89: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 20% a -5°C sin perturbaciones



### 5.3.8 Prueba 8: Control ON-OFF 20% a -5°C con perturbaciones

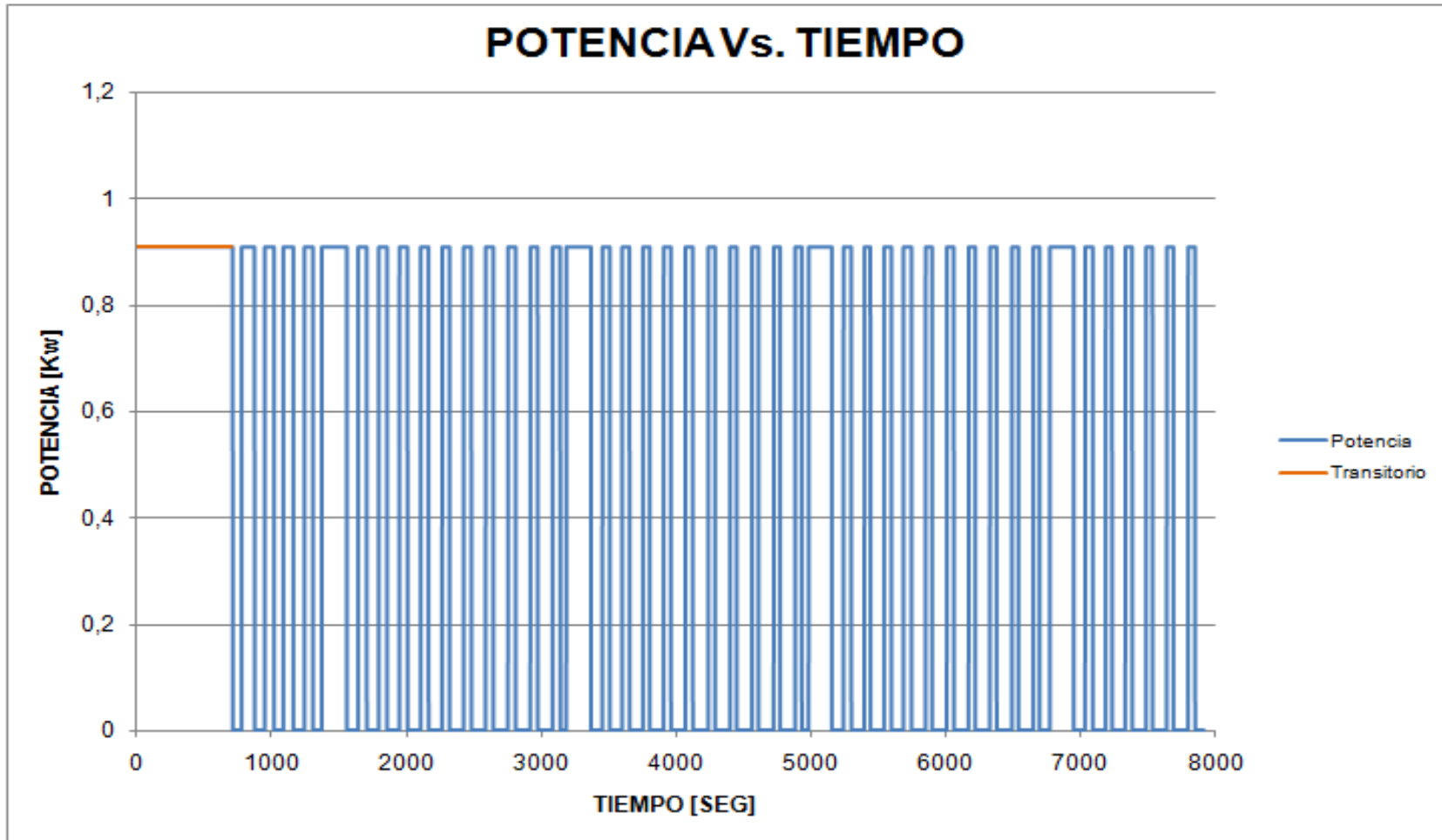
En la figura 90 se puede observar como la cresta en la temperatura de vaporación producida por las perturbaciones es más plana comparada con las anteriores pruebas debido a que se maneja una carga baja con una temperatura baja.

**Figura 90: Comportamiento de las temperaturas en el control ON-OFF 20% a -5°C con perturbaciones**



En la figura 91 se puede observar la gran diferencia que existe entre los tiempos de encendido cuando hay perturbaciones (185 seg) y los tiempos cuando no las hay (60 seg). Podemos ver que el compresor dura más tiempo apagado debido a que la carga es muy baja y se demora más tiempo en calentarse de -5°C a -3°C si se compara con la prueba 6 donde el porcentaje de carga impuesto era del 60%. La potencia consumida en esta prueba fue de 0.91Kw.

Figura 91: Potencia Vs tiempo en el control ON-OFF 20% a -5°C con perturbaciones



En la tabla 27 se puede observar un resumen de las pruebas mostradas anteriormente. Con estos datos se concluye que entre mayor sea la carga y más baja sea la temperatura de vaporación el compresor va a permanecer más tiempo prendido consumiendo una determinada potencia. Al igual se puede observar que entre más baja sea la carga más tiempo demorará el compresor apagado pues el sistema se demora más en ir de una temperatura inferior a una mayor como en el caso de -5°C a -3°C ó de 0°C a 2°C. También se ve el compresor sufre más desgaste a cargas y temperaturas bajas cuando se maneja control ON-OFF porque el compresor tiene más arranques bruscos.

**Tabla 27: Resultados del control ON-OFF en los diferentes escenarios de estudio durante las 2 horas de prueba**

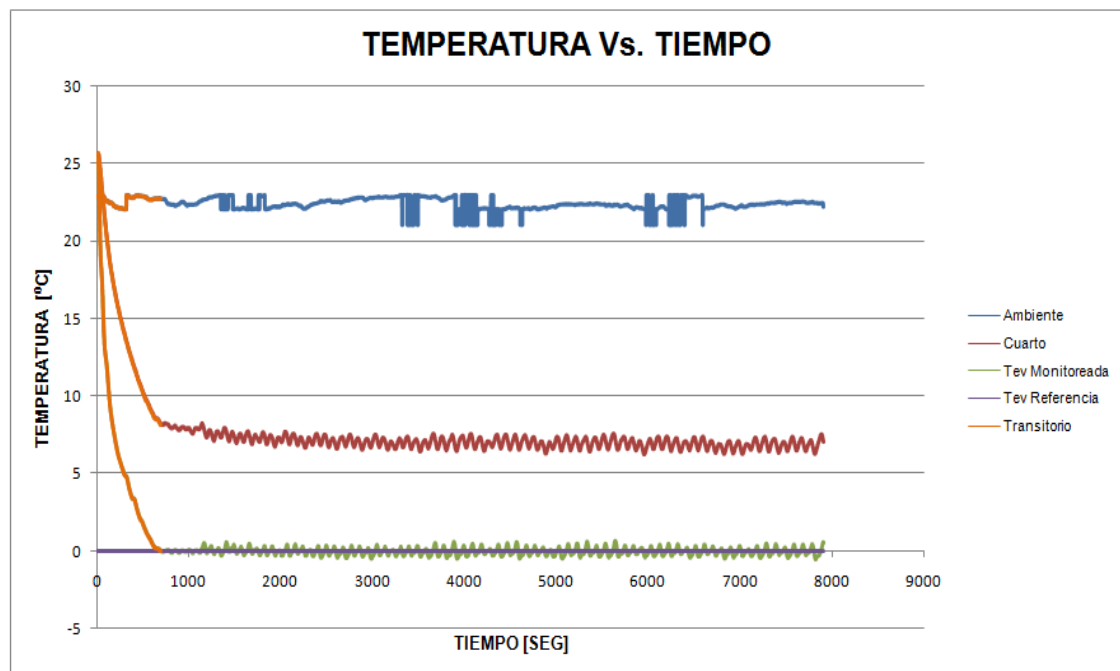
ESCENARIOS DE ESTUDIO		CONTROL ON-OFF							
		0°C				-5°C			
		60%	60%	20%	20%	60%	60%	20%	20%
		SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP
<b>NÚMERO DE VECES PRENDIDO</b>		47	46	45	45	39	35	43	44
<b>NÚMERO DE VECES APAGADO</b>		48	46	46	45	39	36	44	45
<b>TIEMPO PROMEDIO PRENDIDO EN CADA INTERVALO [SEG]</b>		73,98	77,37	62,76	68,13	118,28	138,14	52,86	65,48
<b>TIEMPO PRENDIDO DURANTE LAS PERTURBACIONES [SEG]</b>	1	0	116	0	116	0	315	0	185
	2		93		115		335		182
	3		154		108		291		171
	4		130		129		287		176
<b>TIEMPO PROMEDIO APAGADO EN CADA INTERVALO [SEG]</b>		75,65	77,85	93,96	89,89	64,38	63,75	110,05	94,07
<b>TIEMPO TOTAL PRENDIDO [SEG]</b>		3477	3559	2824	3066	4613	4835	2273	2881
<b>TIEMPO TOTAL APAGADO [SEG]</b>		3631	3581	4322	4045	2511	2295	4842	4233
<b>POTENCIA CONSUMIDA [Kw]</b>		1,04	1,08	1,03	1,03	0,94	0,93	0,92	0,91

Fuente: Autores.

### 5.3.9 Prueba 9: Control PID 60% a 0°C sin perturbaciones

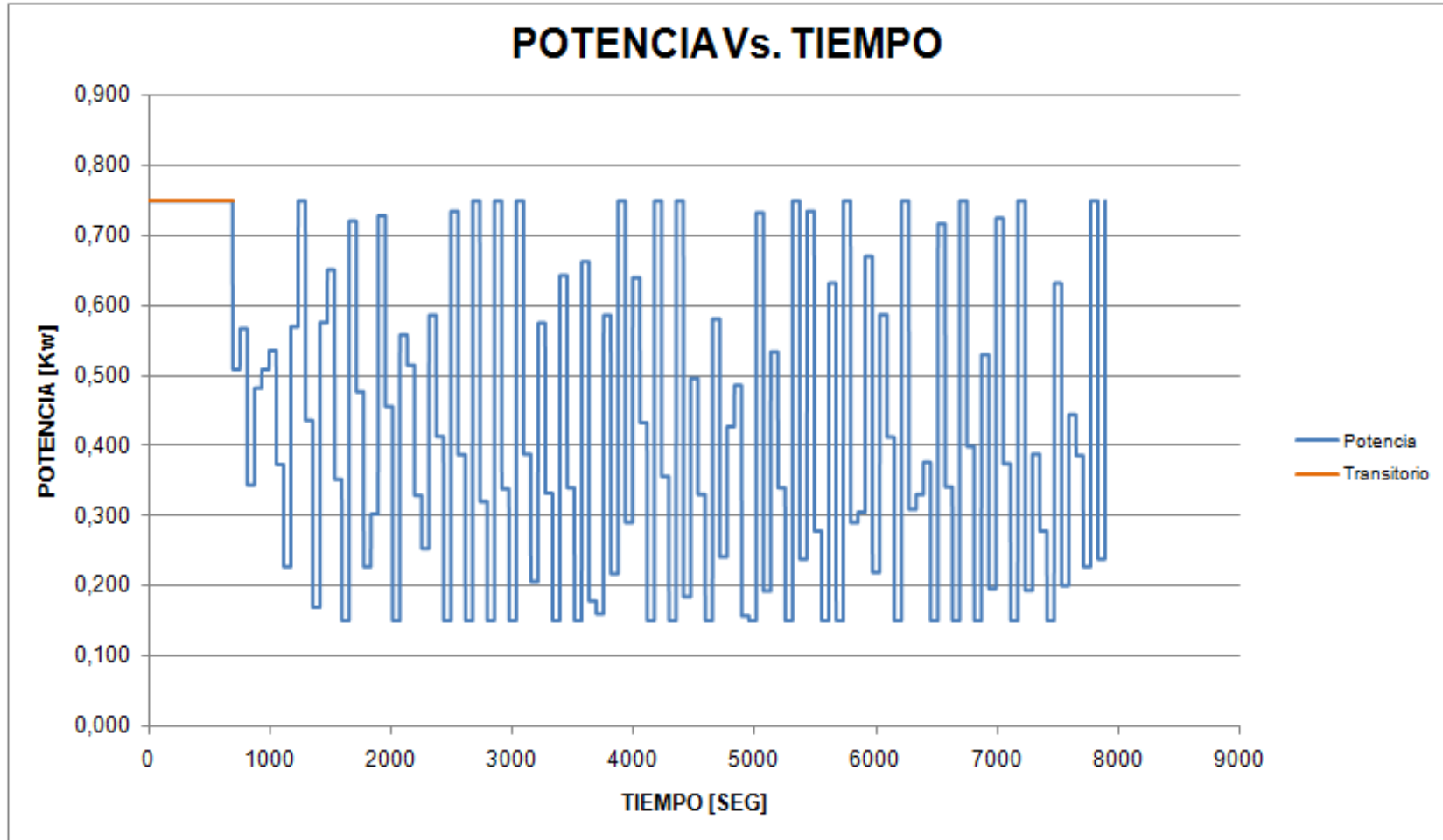
En la figura 92 se puede ver como la temperatura de vaporación debido al control PID permanece muy cercana a la temperatura de referencia dada que en este caso es de 0°C. El efecto de mantener relativamente constante la temperatura de vaporación se refleja claramente en el comportamiento de la temperatura del cuarto que ya no presenta las oscilaciones que tenía en el control ON-OFF sino que trata de mantenerse constante al igual que la temperatura de vaporación.

**Figura 92: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 60% a 0°C sin perturbaciones**



En la figura 93 se ve que el consumo de potencia ya no es constante como ocurría en el control ON-OFF sino que esta oscila entre 0,75Kw (60 Hz) y 0,15Kw (12 Hz) debido al cambio de frecuencia que da el variador de velocidad producto del control PID.

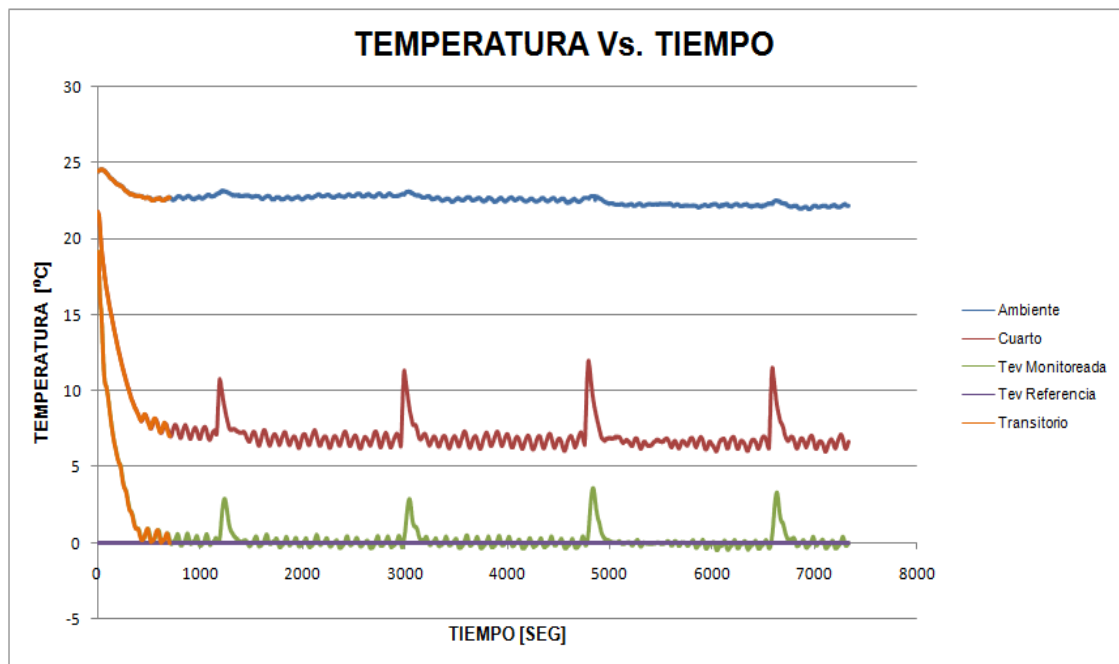
Figura 93: Potencia Vs tiempo en el control PID 60% a 0°C sin perturbaciones



### 5.3.10 Prueba 10: Control PID 60% a 0°C con perturbaciones

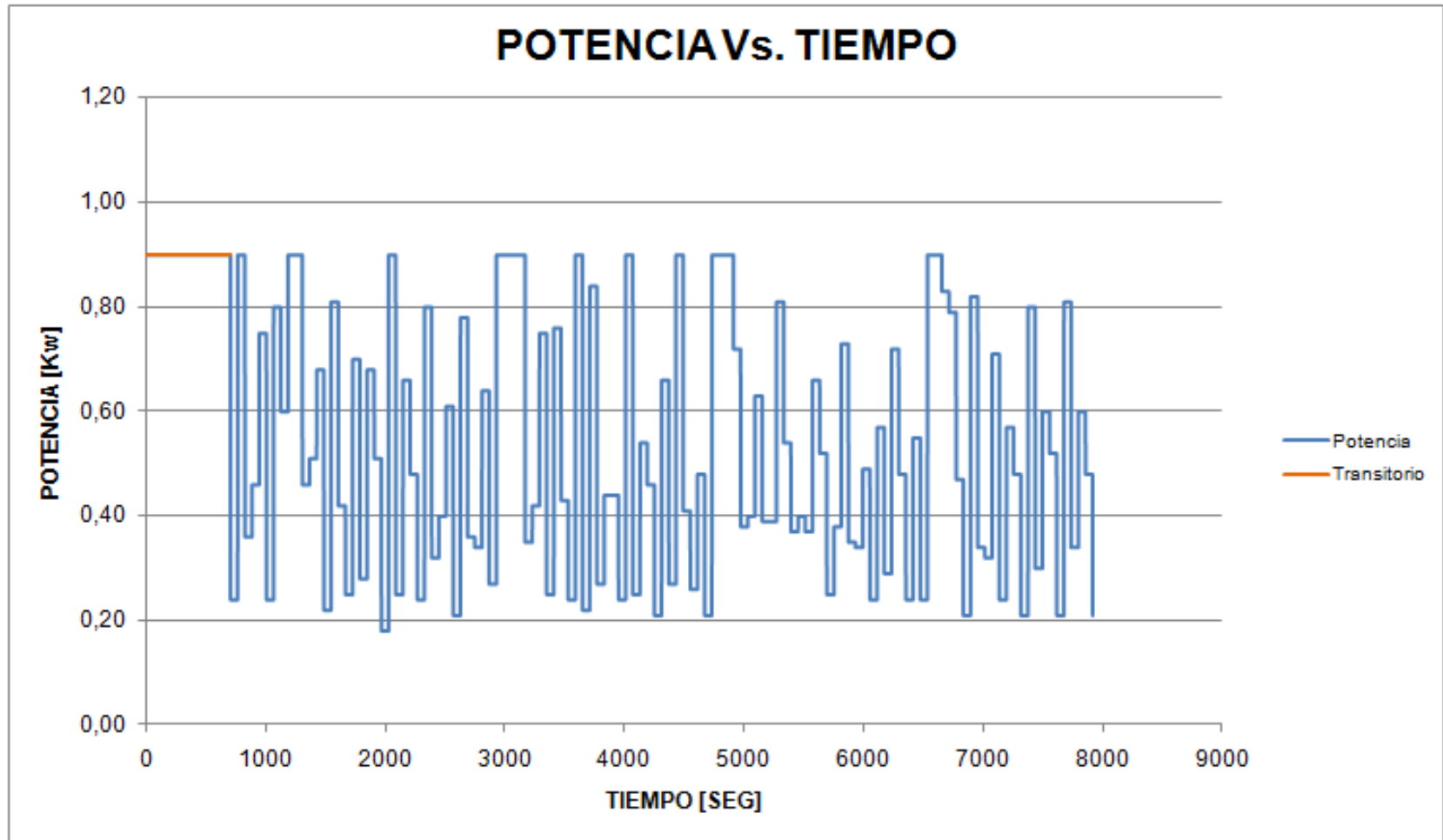
En esta prueba la temperatura ambiente permaneció constante en 22°C. La forma de las perturbaciones que se presenta en esta prueba es diferente a la de la prueba 2 presentando el control continuo menor tiempo para recuperar la temperatura de vaporación de referencia debido a que el compresor se encuentra siempre en trabajo continuo, por eso la cresta es más puntuda con control PID (Ver figura 94).

**Figura 94: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 60% a 0°C con perturbaciones**



En la figura 95 se puede observar el efecto que producen las perturbaciones haciendo que el compresor dure más tiempo a su máxima frecuencia (60Hz) especialmente en la segunda perturbación donde dura casi 4 minutos a 60Hz para no dejar subir tanto la temperatura de vaporación a diferencia de las dos últimas perturbaciones.

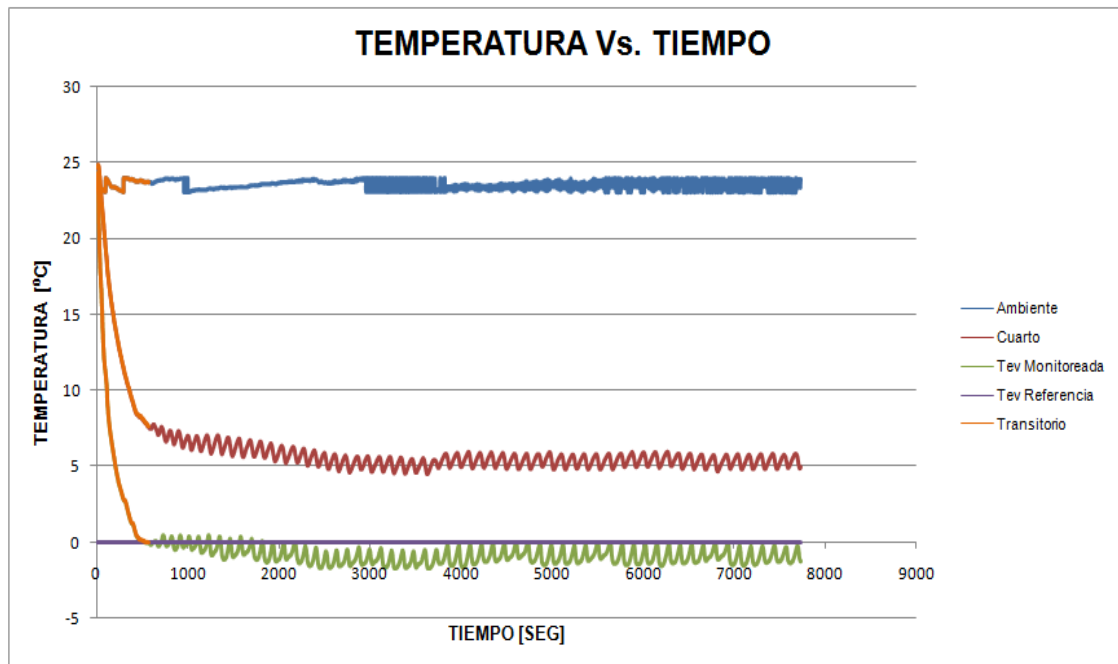
Figura 95: Potencia Vs tiempo en el control PID 60% a 0°C con perturbaciones



### 5.3.11 Prueba 11: Control PID 20% a 0°C sin perturbaciones

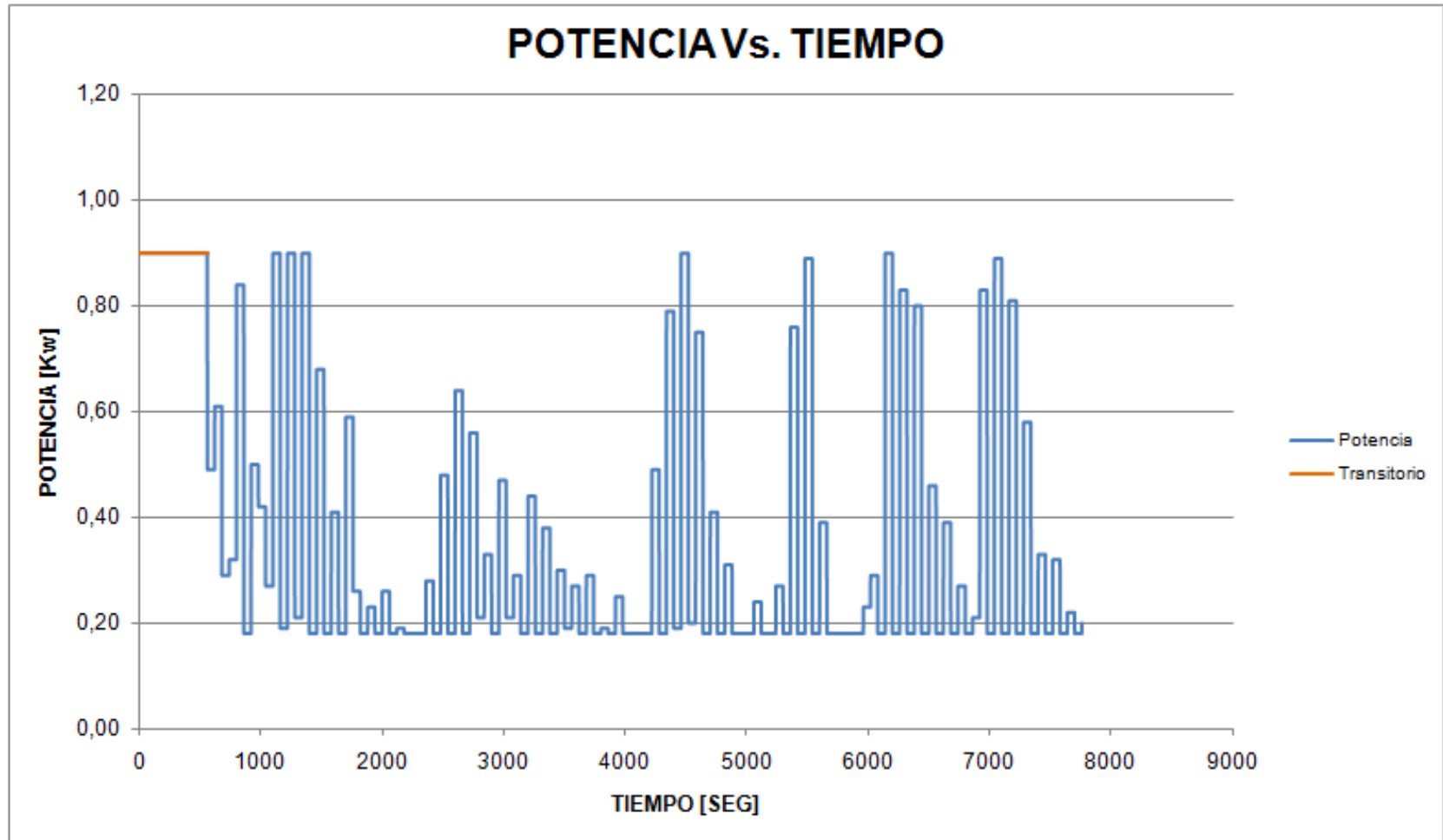
En la figura 96 se puede ver como el control PID de la temperatura de vaporación se desvía un poco de la temperatura de referencia debido a que para la menor frecuencia manejada (12 Hz) la estabilización se da en -1°C entonces para que quedara en 0°C tocaría disminuir aún más la frecuencia lo que ocasionaría problemas de vibración, ruido y lubricación en el compresor.

**Figura 96: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 20% a 0°C sin perturbaciones**



En la figura 97 se puede ver que el compresor estuvo funcionando varias veces (54) a la más mínima frecuencia originando un consumo de potencia mínimo en esos momentos e igual a 0,18Kw y muy pocas veces (5) funciono a su máxima frecuencia pues la carga impuesta en el sistema no lo ameritaba.

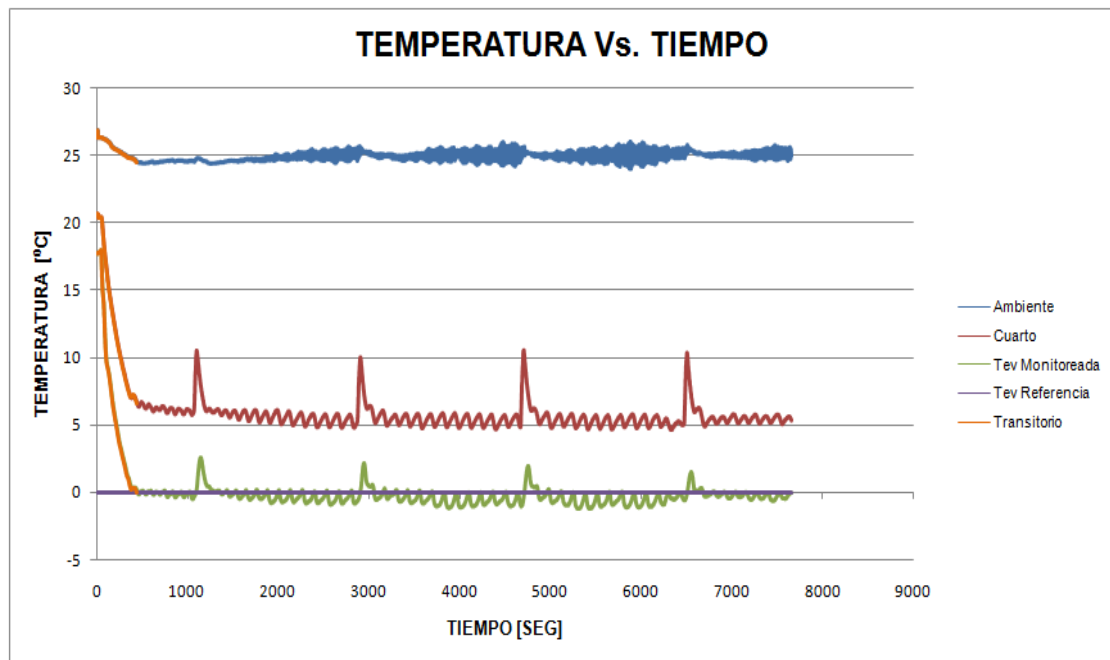
Figura 97: Potencia Vs tiempo en el control PID 20% a 0°C sin perturbaciones



### 5.3.12 Prueba 12: Control PID 20% a 0°C con perturbaciones

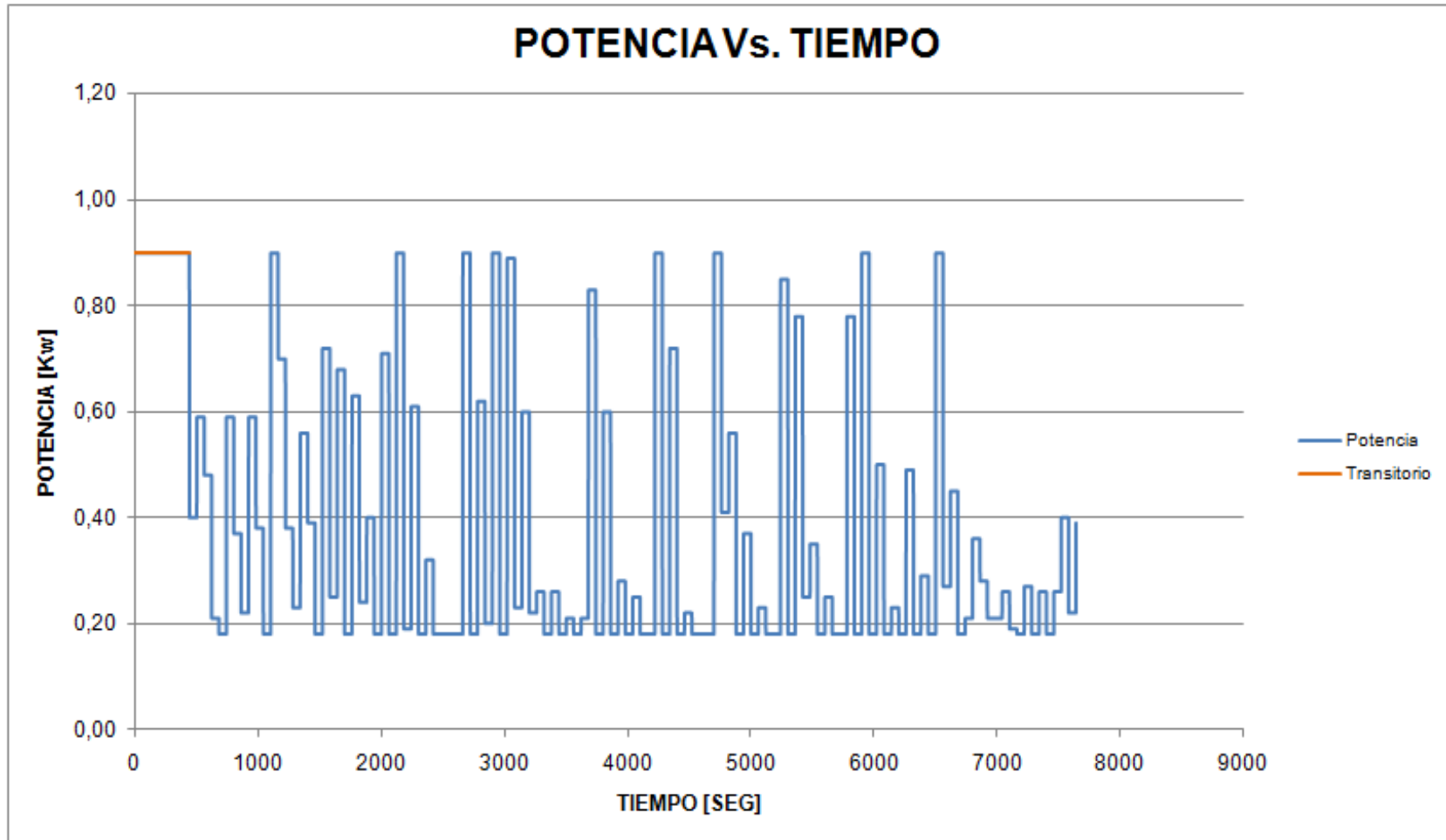
En la figura 98 se puede observar el efecto de las perturbaciones en el comportamiento de la temperatura de vaporación y a diferencia de la anterior prueba debido al incremento de carga que producen las perturbaciones si se logra mantener relativamente la temperatura de vaporación monitoreada cerca a la de referencia. También se puede ver como las crestas producto de las perturbaciones son muy pequeñas comparadas con las anteriores pruebas realizadas.

**Figura 98: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 20% a 0°C con perturbaciones**



En la figura 99 se puede observar como el efecto de las perturbaciones no afecta tanto el consumo de potencia debido a que la carga manejada es muy baja provocando únicamente 8 veces que el compresor trabaje a 60 Hz.

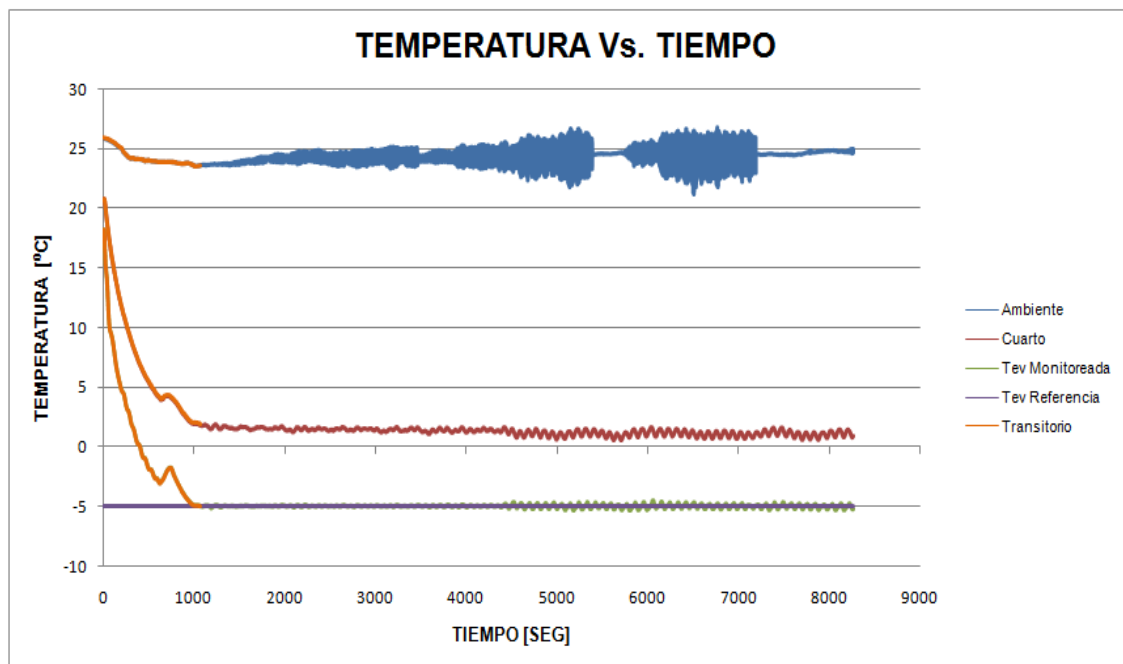
Figura 99: Potencia Vs tiempo en el control PID 20% a 0°C con perturbaciones



### 5.3.13 Prueba 13: Control PID 60% a -5°C sin perturbaciones

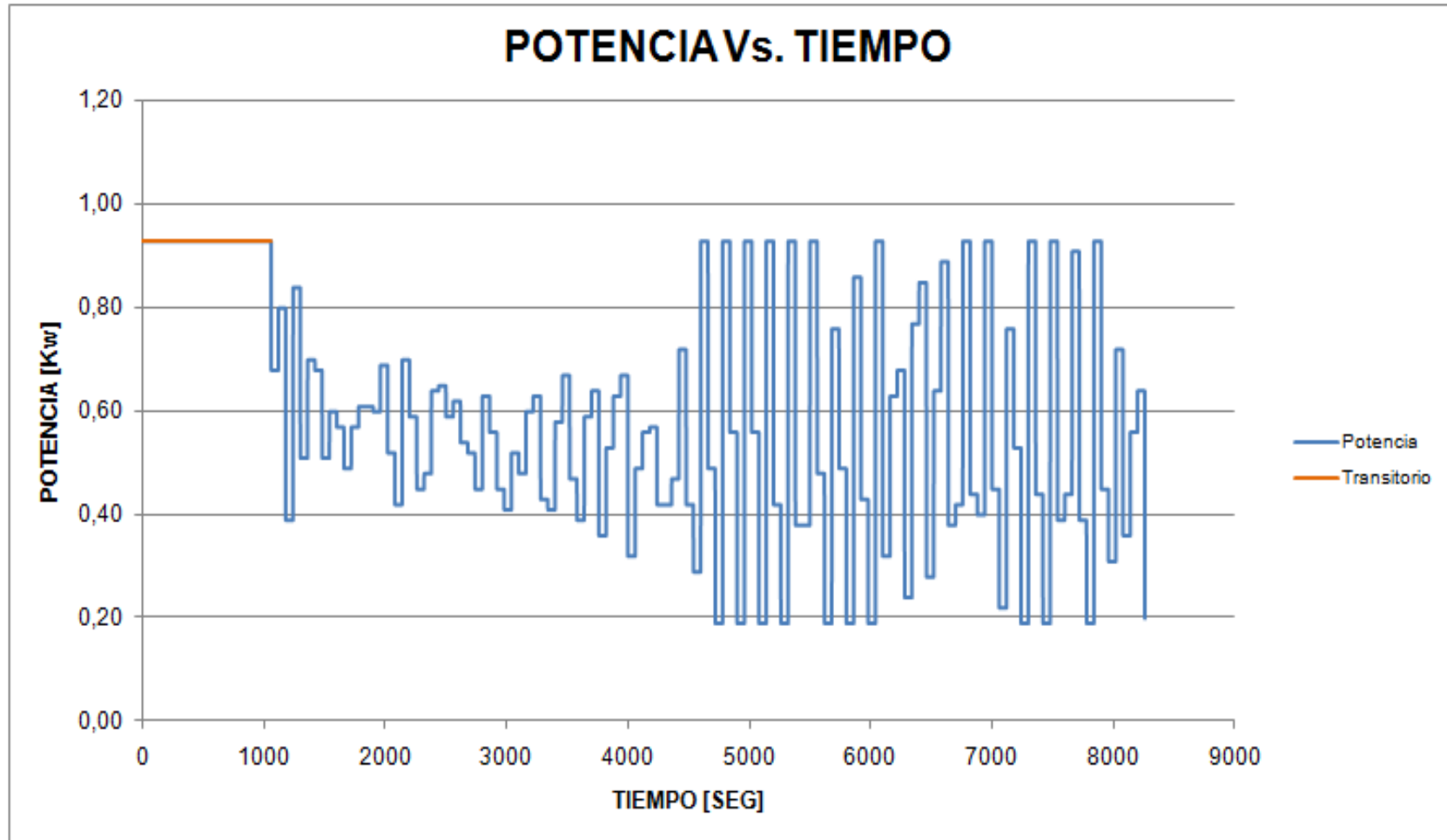
En la figura 100 se puede observar como la temperatura de vaporación permanece constante e igual al valor de referencia dada (-5°C) y como implícitamente al hacer el control sobre la temperatura de vaporación se hace control sobre la temperatura del cuarto frío.

**Figura 100: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 60% a -5°C sin perturbaciones**



En la figura 101 se puede observar como durante la primera hora de prueba la temperatura de vaporación permaneció igual a la de referencia generando consumos de potencia mínimos y en la segunda hora donde la temperatura medida se alejó un poco de la de referencia se incrementaron los consumos de potencia presentándose 12 veces la máxima potencia de 0,93 Kw.

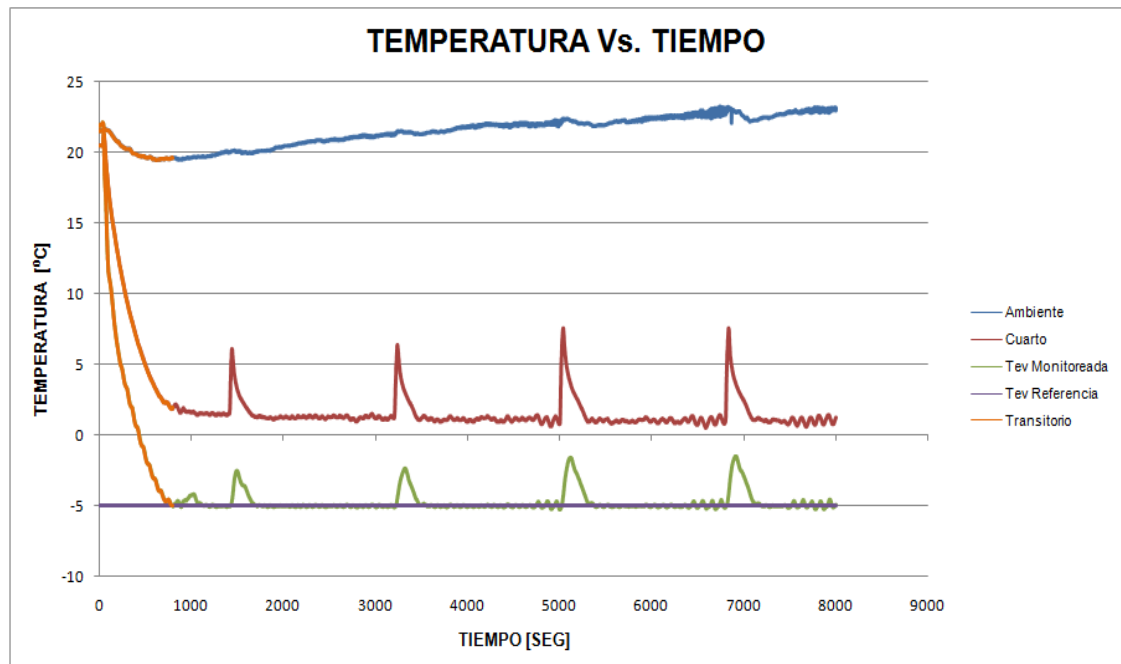
Figura 101: Potencia Vs tiempo en el control PID 60% a -5°C sin perturbaciones



### 5.3.14 Prueba 14: Control PID 60% a -5°C con perturbaciones

En la figura 102 se puede observar la respuesta del sistema al control PID generando una temperatura de vaporación constante a lo largo de la prueba. Se ve como en las primeras dos perturbaciones donde error<sup>12</sup> es mínimo se generan pequeños picos comparados con los dos últimos donde el error incrementa un poco.

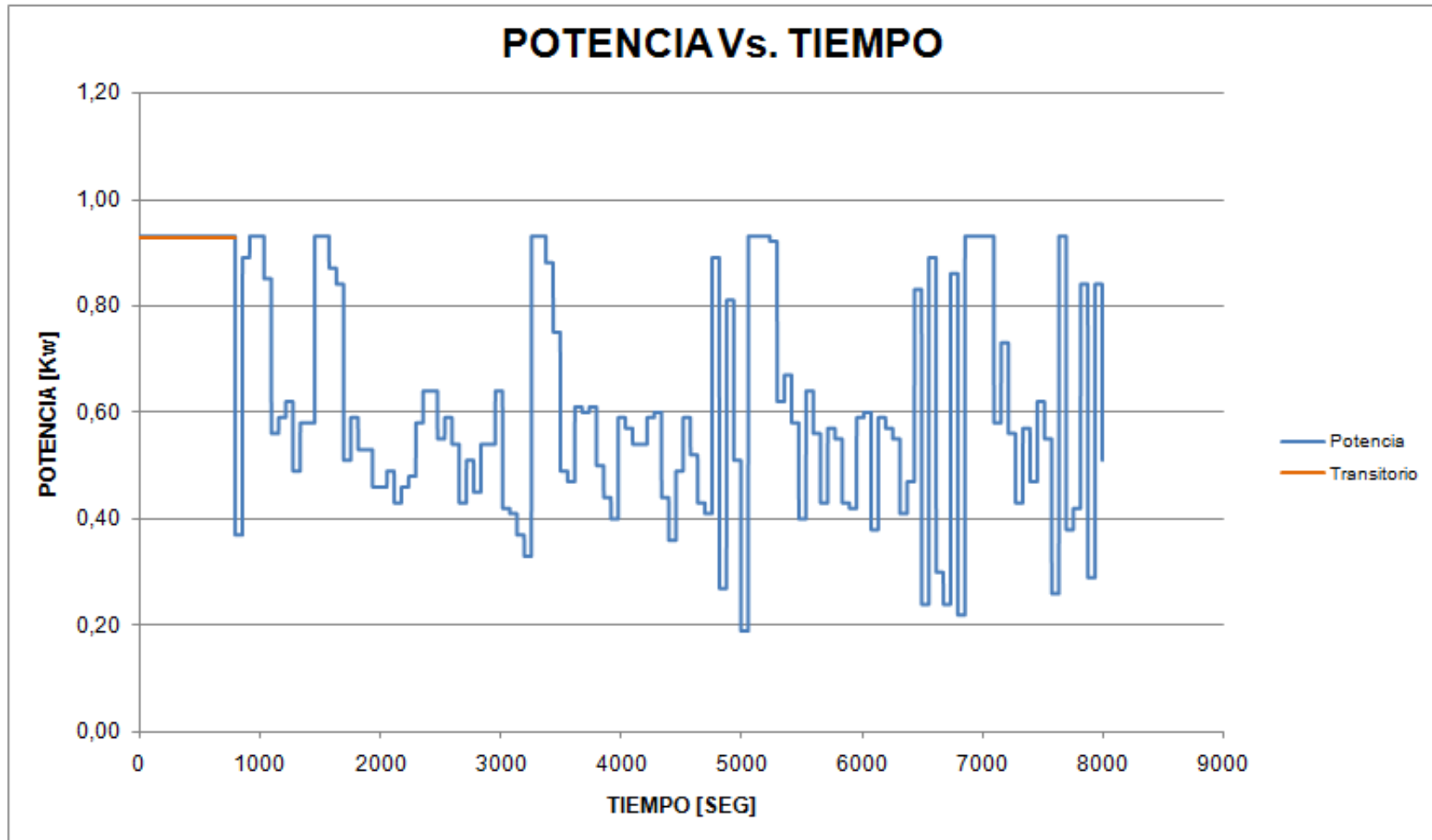
**Figura 102: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 60% a -5°C con perturbaciones**



En la figura 103 se puede ver como el compresor funciona solo una vez a su más baja frecuencia (12 Hz), esto es debido a la alta carga que tiene el sistema y a la baja temperatura de evaporación que se está manejando. Se puede observar que el sistema consume más potencia en el momento que se le imponen las perturbaciones.

<sup>12</sup> Error: diferencia entre la temperatura de vaporación medida y la temperatura de vaporación de referencia

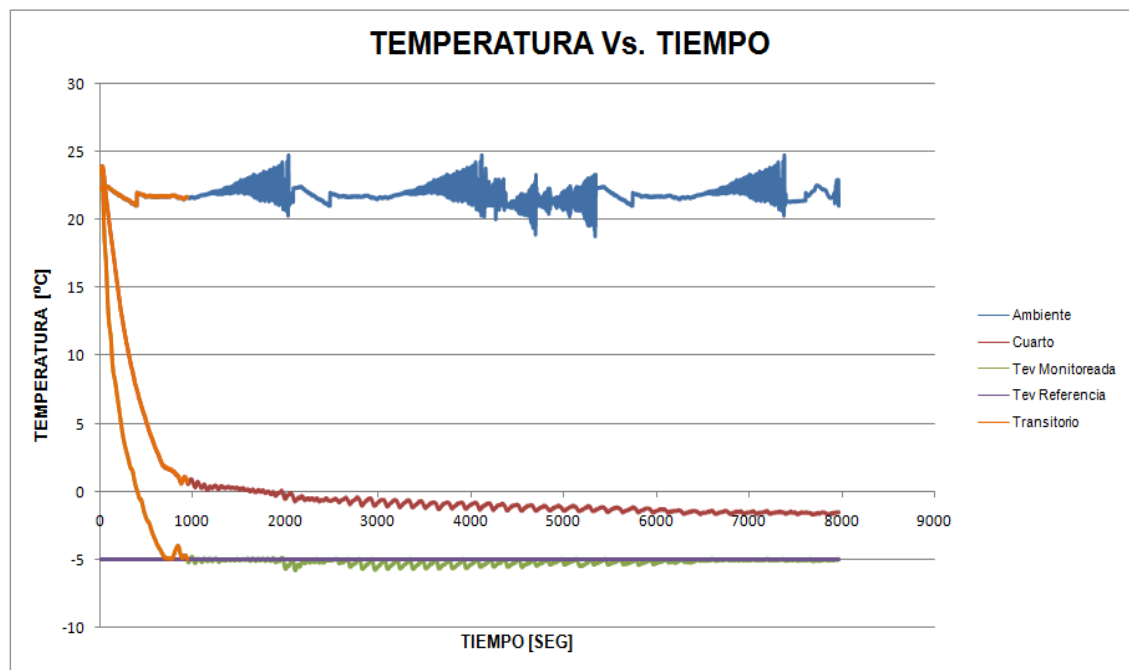
Figura 103: Potencia Vs tiempo en el control PID 60% a -5°C con perturbaciones



### 5.3.15 Prueba 15: Control PID 20% a -5°C sin perturbaciones

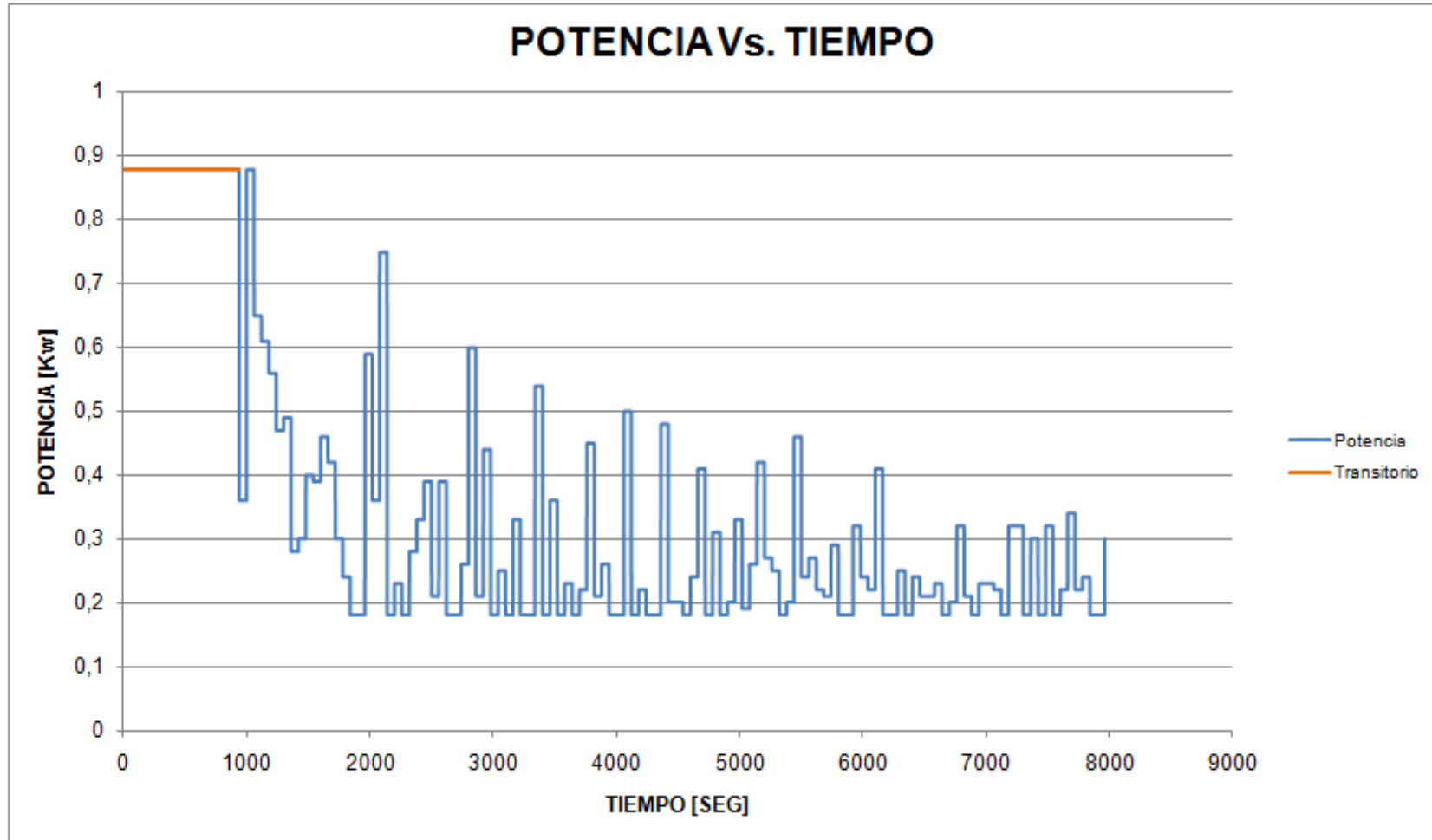
En la figura 104 se ve una leve diferencia entre la temperatura de vaporación y la referencia lo que produce que la temperatura del cuarto frío tienda a ir disminuyendo en el tiempo en lugar de permanecer constante.

**Figura 104: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 20% a -5°C sin perturbaciones**



Respecto al consumo de potencia se puede observar en la figura 105 que es mínimo y no presenta tantas oscilaciones como en pruebas anteriores. A lo largo de la prueba el consumo de potencia del compresor se encuentra oscilando entre 0.4Kw y 0,18Kw, presentando solo una vez su máximo consumo de potencia de 0,88Kw.

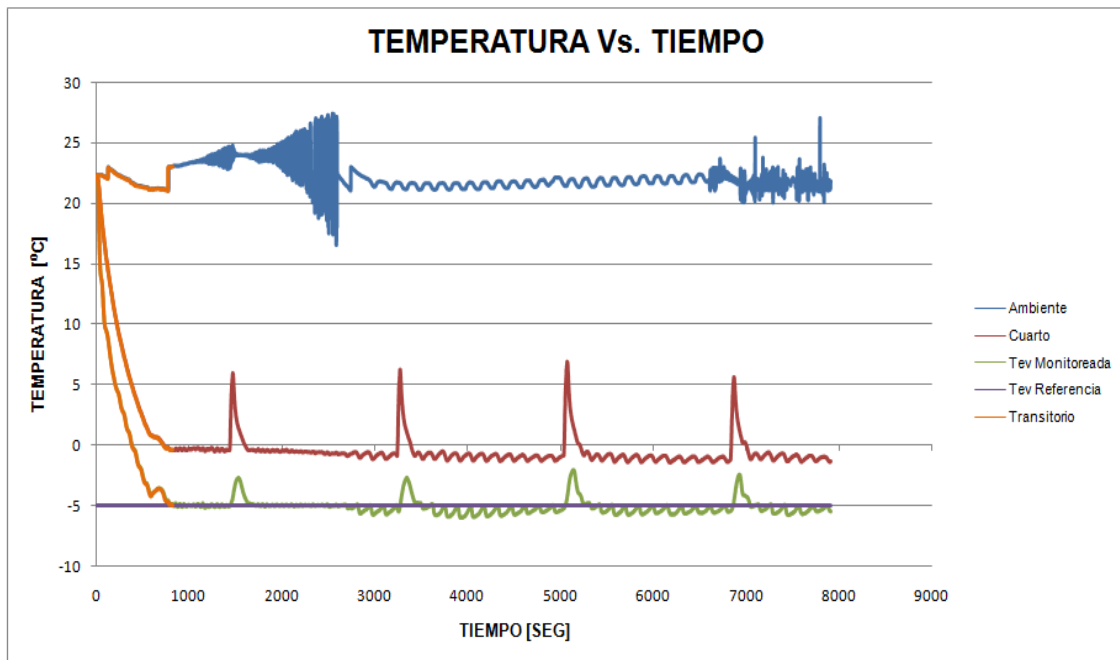
FIGURA 105: Potencia Vs tiempo en el control PID 20% a -5°C sin perturbaciones



### 5.3.16 Prueba 16: Control PID 20% a -5°C con perturbaciones

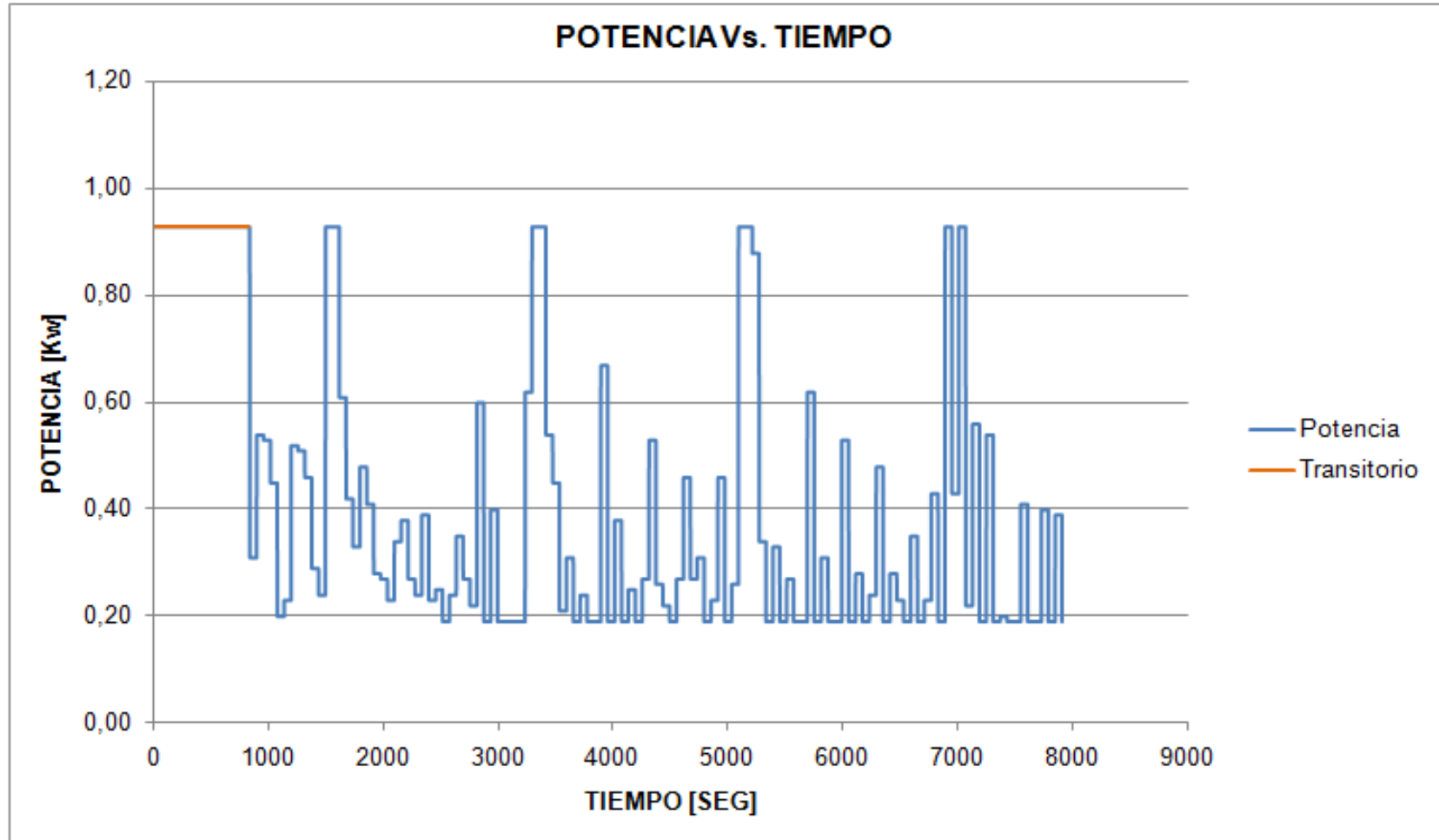
En la figura 106 vemos como en la primera perturbación el control PID disminuye el efecto de esta en la temperatura de vaporación, mientras que en las otras tres donde el error del control aumenta estas perturbaciones se presentan con unas crestas mayores.

**Figura 106: Comportamiento de las temperaturas en el control PID 20% a -5°C con perturbaciones**



En la figura 107 se ve el efecto del aumento del error del control PID en el consumo de potencia pues en el primer intervalo la potencia consumida es menor y no varía tanto como lo hace en los otros tres intervalos donde el error aumenta. El compresor permanece 37 veces trabajando a su mínima frecuencia provocando consumos de potencia de 0,19 Kw y 8 veces a su máxima frecuencia dando consumos de 0.93Kw.

Figura 107: Potencia Vs tiempo en el control PID 20% a -5°C con perturbaciones



En la tabla 28 se presentan los extremos de potencia obtenidos en las pruebas con control PID para los diferentes escenarios manejados en este estudio. En conclusión de estas pruebas se puede decir que en el control continuo a diferencia del control ON-OFF maneja potencias diferentes de 0 y  $P_{m\acute{a}x}$ , debido a la posibilidad que presenta este control de variar la frecuencia de operación del compresor adaptándola a la capacidad que se le imponga al sistema. Por otro lado se ve como el error del control PID tiene un gran efecto en el consumo de potencia del compresor generando más consumo cuando ese error es mayor que cuando es mínimo. Por otro lado el amortiguamiento de las perturbaciones es mejor cuando la temperatura de evaporación monitoreada es casi igual a la de referencia.

Como la señal de salida del control PID está limitado entre 0-10V cuando la carga es muy baja al control le cuesta trabajo mantener constante e igual la temperatura de vaporación a la referencia, es por esto que trata de estabilizarse a una temperatura un poco más baja como ocurrió en la prueba 11, pues la carga que se impone no es suficiente para mantener la temperatura de vaporación a 0°C cuando se maneja una frecuencia de 12Hz.

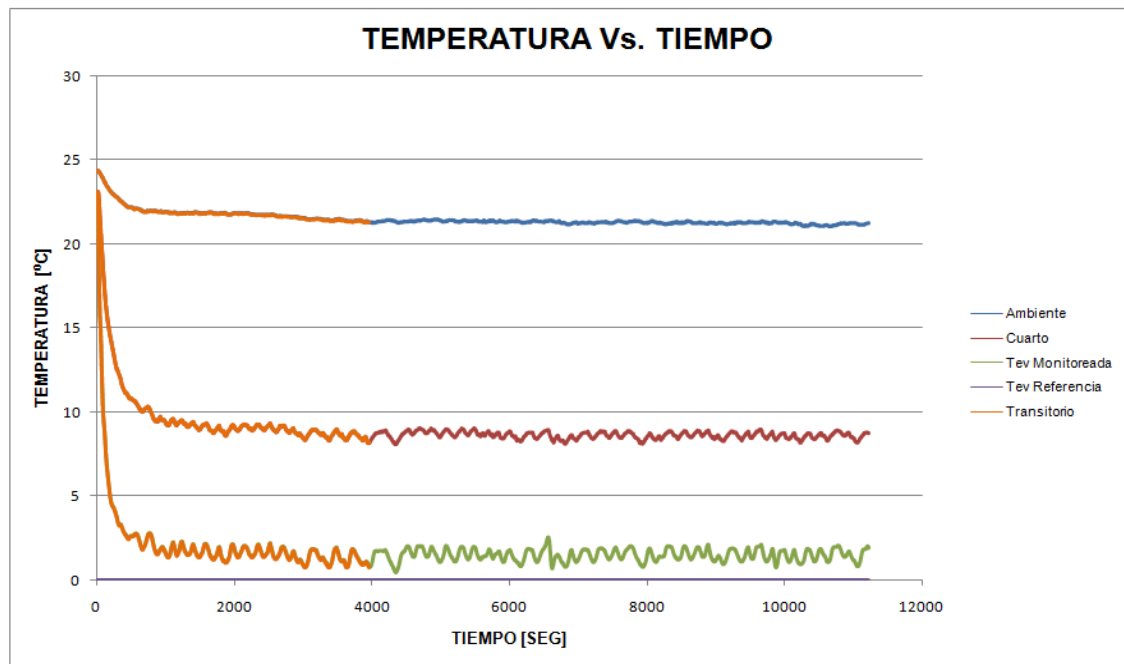
**Tabla 28: Intervalos de potencia consumida en el control PID en los diferentes escenarios de estudio durante las 2 horas de prueba**

ESCENARIOS DE ESTUDIO	CONTROL PID							
	0°C				5°C			
	60%	60%	20%	20%	60%	60%	20%	20%
	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP
POTENCIA MÁXIMA	0,75	0,9	0,9	0,9	0,93	0,93	0,88	0,93
NÚMERO DE VECES A POTENCIA MÁXIMA	0,15	0,24	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,19
POTENCIA MÍNIMA	13	16	5	8	12	14	1	8
NÚMERO DE VECES A POTENCIA MÍNIMA	21	13	54	44	10	1	35	37

### 5.3.17 Prueba 17: Control FUZZY 60% a 0°C sin perturbaciones

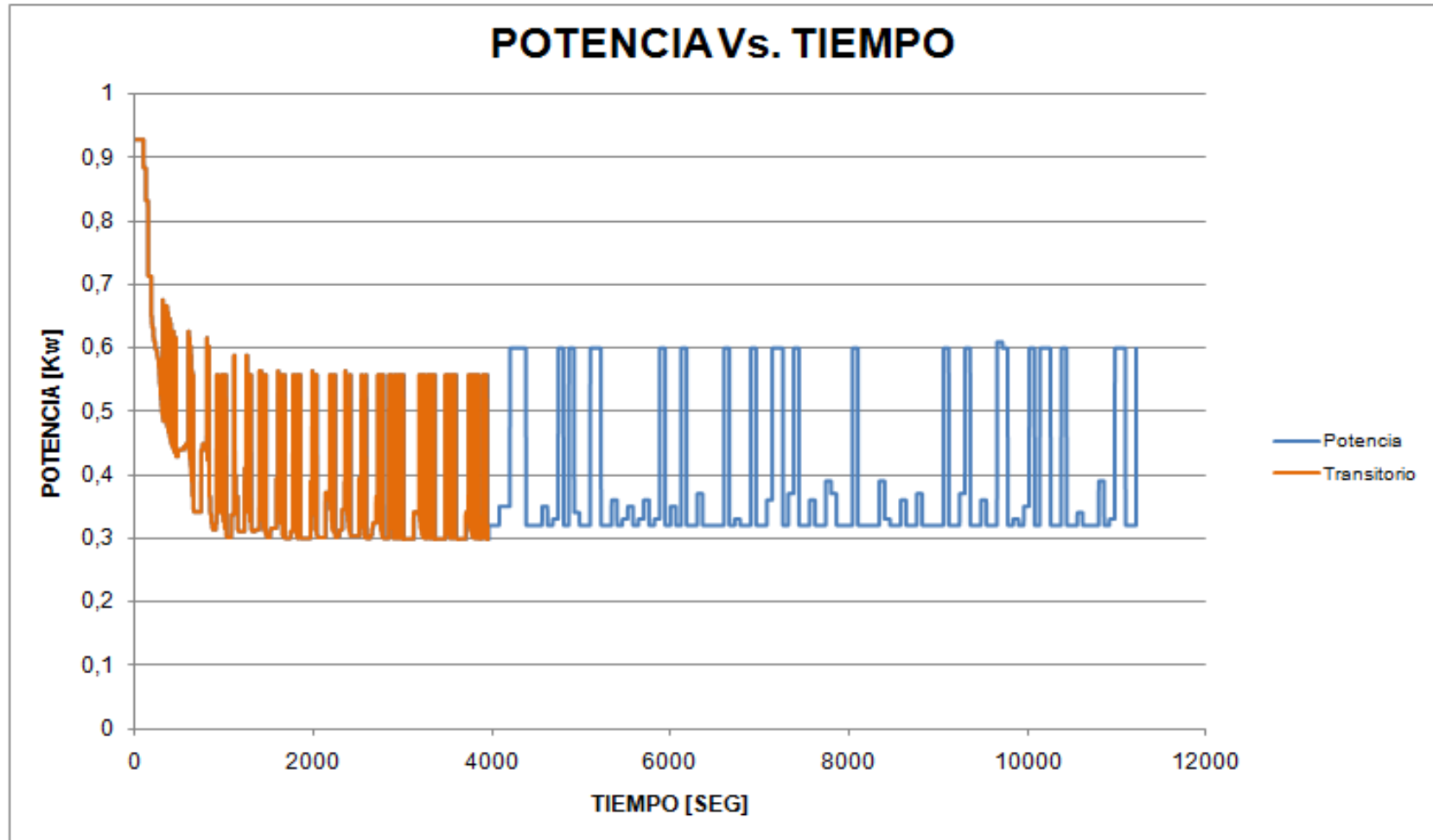
En la figura 108 se muestra como el control de la temperatura de vaporación se hace por encima de la temperatura de referencia permaneciendo esta oscilación constante a lo largo de la prueba, esto es debido a las reglas manejadas en control fuzzy.

**Figura 108: Comportamiento de las temperaturas en el control FUZZY 60% a 0°C sin perturbaciones**



En la figura 109 se puede ver como a diferencia de los anteriores dos controles el estado transitorio de esta prueba es más largo debido a que el control fuzzy hace control desde 25°C. Se puede observar que la potencia en este control se mantiene más constante y esta oscilando entre 0,6 Kw y 0,3 Kw.

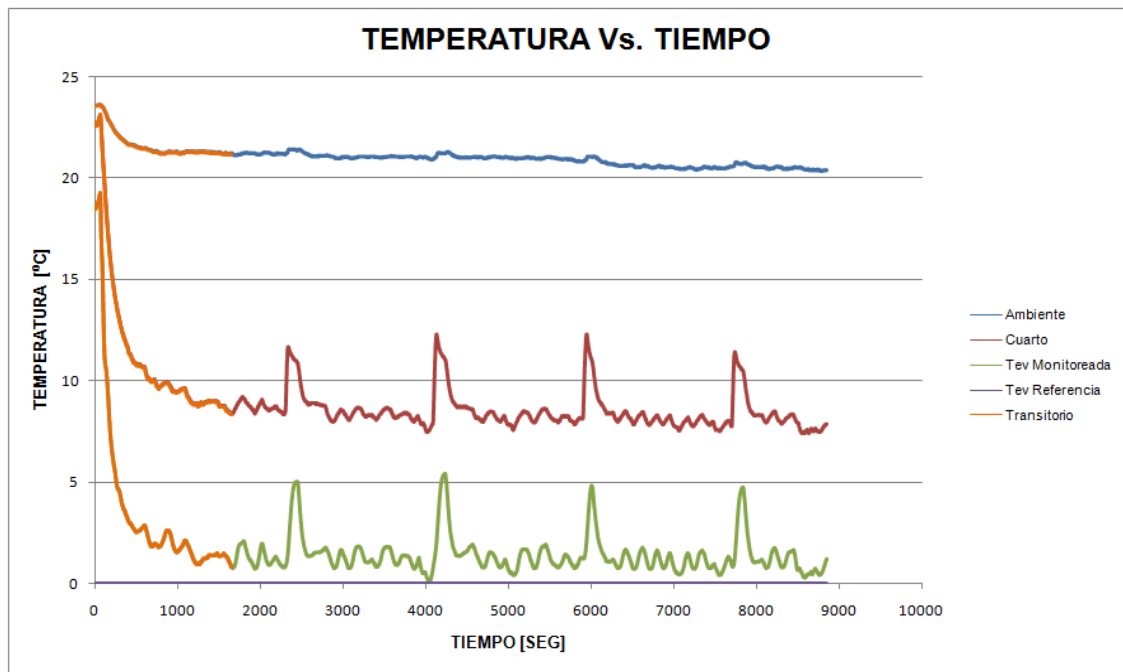
Figura 109: Potencia Vs tiempo en el control FUZZY 60% a 0°C sin perturbaciones



### 5.3.18 Prueba 18: Control FUZZY 60% a 0°C con perturbaciones

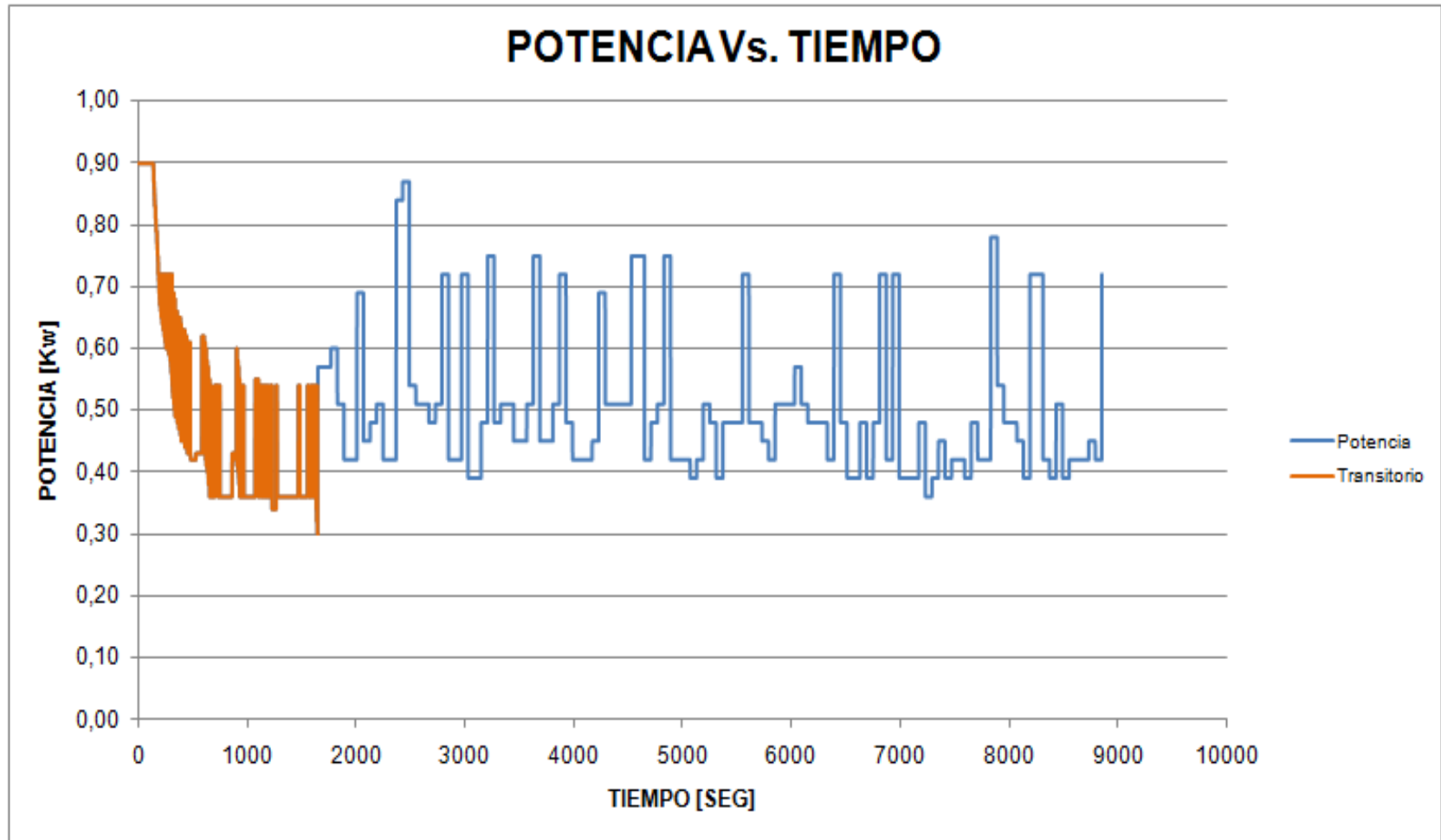
En la figura 110 se observa el efecto de las perturbaciones en la temperatura de vaporación produciendo crestas muy altas cercanas a 5°C, lo que no ocurría con el control PID para el mismo escenario.

**Figura 110: Comportamiento de las temperaturas en el control FUZZY 60% a 0°C con perturbaciones**



En la figura 111 se ve un consumo de potencia uniforme un poco mayor a la anterior prueba producto del aumento de la carga impuesta por las perturbaciones. Se puede ver que el transitorio de esta prueba es bastante largo casi de 30 minutos. El consumo de potencia se encuentra oscilando entre 0,75Kw y 0,39 Kw.

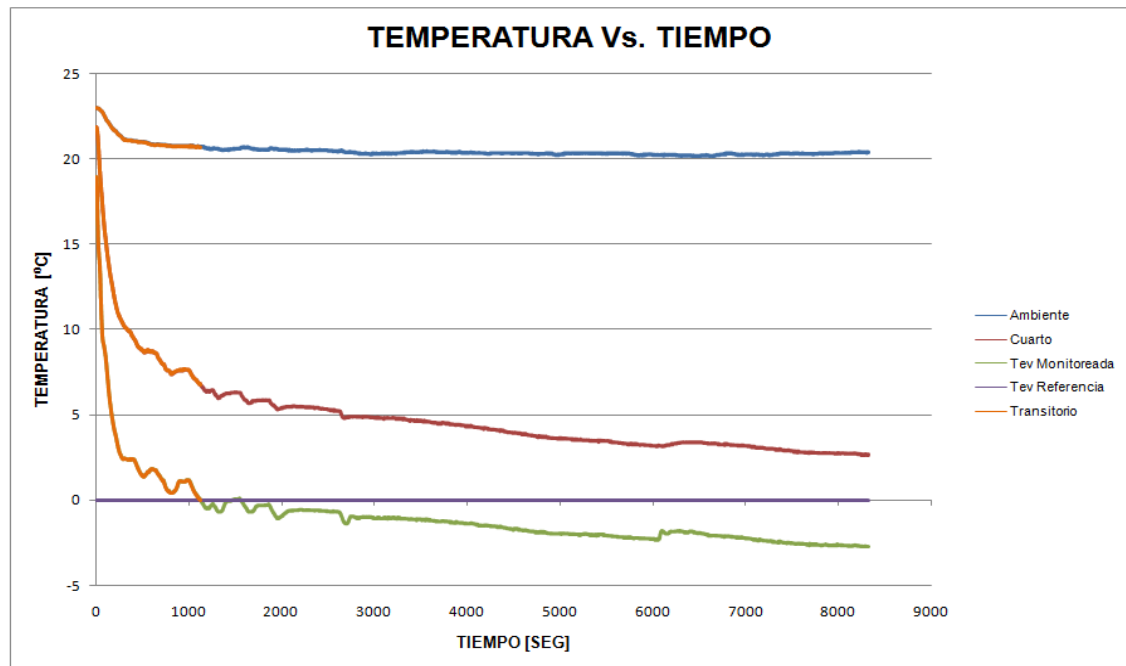
FIGURA 111: Potencia Vs tiempo en el control FUZZY 60% a 0°C con perturbaciones



### 5.3.19 Prueba 19: Control FUZZY 20% a 0°C sin perturbaciones

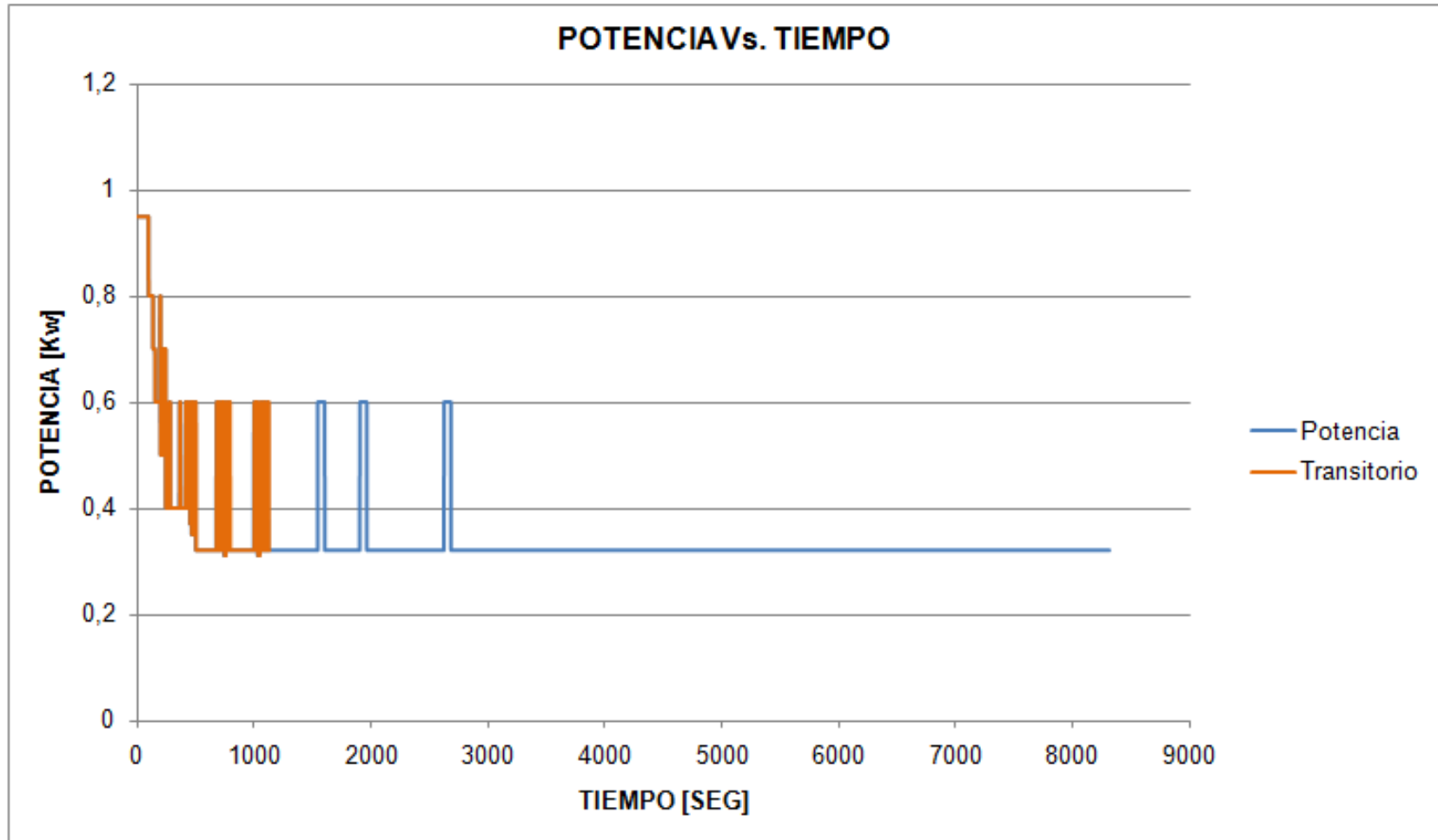
Como se puede observar en la figura 112 la temperatura de vaporación al principio trata de mantenerse constante pero después debido a la baja carga impuesta en el sistema, esta empieza a disminuir del punto de referencia quedando estable durante un tiempo para posteriormente hacer otra disminución. Esto se debe a que la salida menor del control FUZZY está a 12 Hz produciéndose unas RPM todavía muy grandes para la baja carga del sistema.

**Figura 112: Comportamiento de las temperaturas en el control FUZZY 20% a 0°C sin perturbaciones**



En esta prueba la potencia permanece constante con un valor de 0,32 Kw excepto tres veces donde la potencia se dispara a 0,6 Kw, como se puede ver en la figura 113.

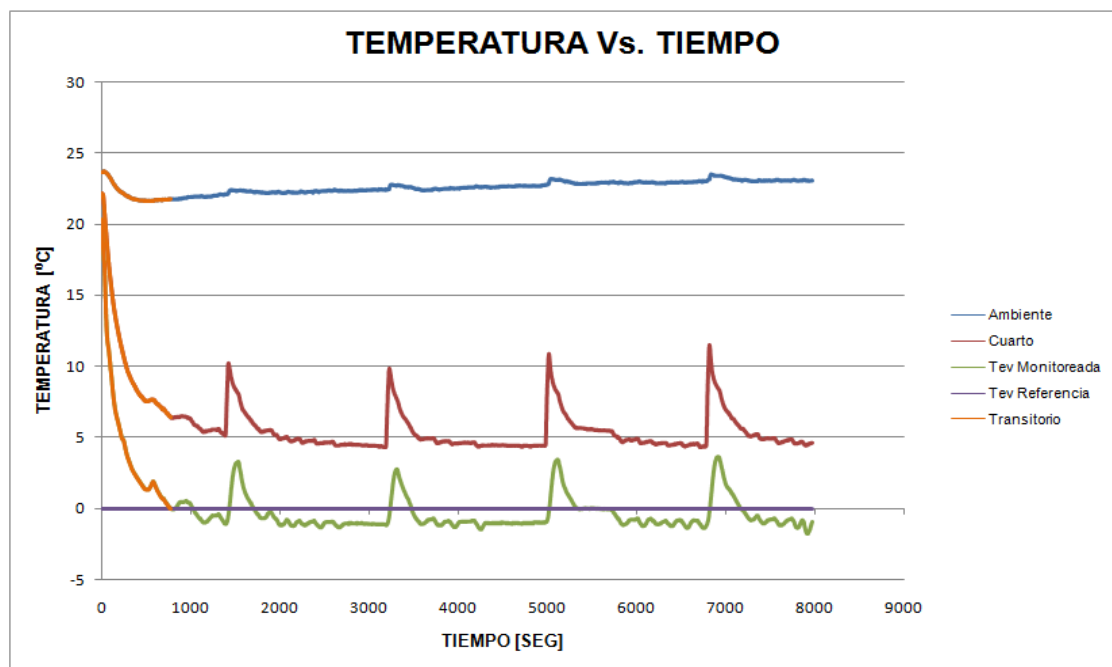
Figura 113: Potencia Vs tiempo en el control FUZZY 20% a 0°C sin perturbaciones



### 5.3.20 Prueba 20: Control FUZZY 20% a 0°C con perturbaciones

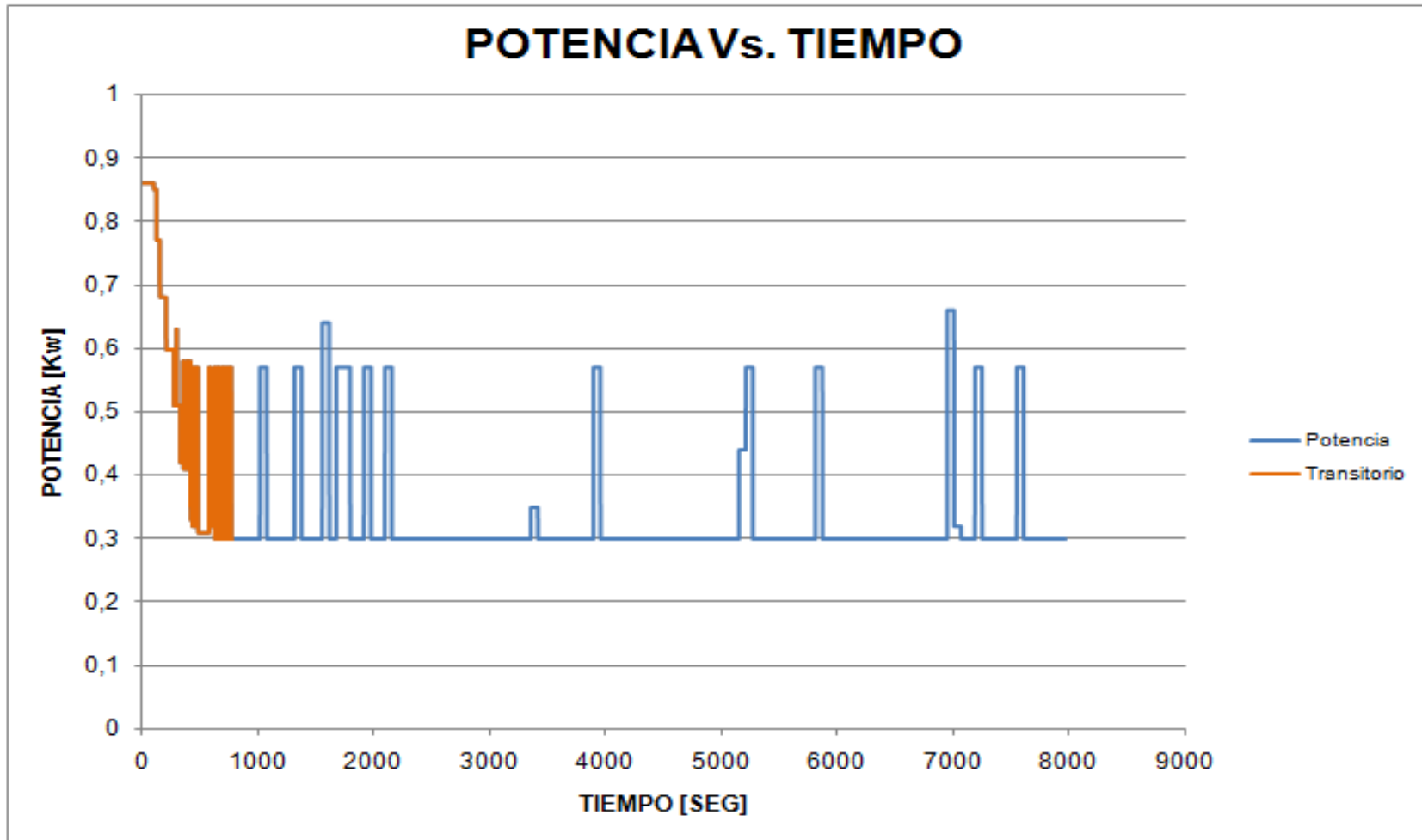
En la figura 114 se observa un mejor control de la temperatura de vaporación que en la prueba anterior esto debido al aumento de carga producido por las perturbaciones. También se observa como la forma de las perturbaciones es diferente a las de las otras pruebas pues el incremento de la temperatura no sube progresivamente sino súbitamente y después si baja progresivamente.

**Figura 114: Comportamiento de las temperaturas en el control FUZZY 20% a 0°C con perturbaciones**



El consumo de potencia en esta prueba es relativamente constante con un valor de 0,3Kw, generándose un pequeño incremento producto de las perturbaciones. A diferencia del control PID el control Fuzzy mantiene más constante la potencia (Ver figura 115).

Figura 115: Potencia Vs tiempo en el control FUZZY 20% a 0°C con perturbaciones



## 6 DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL IMPLEMENTADAS EN EL CUARTO FRÍO

En este capítulo se determinó el consumo energético de las dos estrategias implementadas en el cuarto frío: control ON-OFF y control continuo (PID y lógica fuzzy) las cuales posteriormente se compararon para hallar los porcentajes de ahorro de las mismas.

### 6.1 DETERMINACION DE CONSUMO DE ENERGIA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

A continuación se explicara los cálculos que se realizaron para determinar el consumo de energía de la estrategia de control ON-OFF para los diferentes escenarios en estudio.

1. Se hallaron los tiempos de encendido y apagado del compresor, restando la hora de encendido y apagado del compresor.
2. Los tiempos hallados en el ítem anterior se pasaron a horas y se multiplicaron por la potencia para hallar finalmente la energía consumida durante los periodos de encendido del compresor.

$$t_{prueba} = \sum t_i + t_0 = 2 \text{ horas} \quad (6.1)$$

$$E_{total} = \sum_{i=0}^n Pot_i \times t_i \quad [Kw - h] \quad (6.2)$$

Donde:

*Pot*: Potencia medida durante los tiempos de encendido del compresor.

$t_i$ : Tiempo que dura el compresor encendido; [horas].

$t_0$ : Tiempo que dura el compresor apagado, [horas].

3. Finalmente para determinar el consumo de energía durante una hora se sumaron todos los valores de energía encontrados y se dividieron en 2.

$$E_{total-hora} = \frac{\sum E_{total}}{2}$$

En la tabla 29 se puede observar el formato de cálculo generado en Excel para determinar el consumo energético de los diferentes escenarios bajo un control ON-OFF.

En la figura 116 se puede ver el consumo de energía de los diferentes escenarios cuando se hace control ON-OFF de la temperatura de vaporación. Como se puede observar el escenario que mayor energía consume es el de capacidad al 60% con una temperatura de vaporación de  $-5^{\circ}\text{C}$  con perturbaciones debido a que en este escenario se maneja mayor carga y se tiene que conservar una temperatura de vaporación más baja. El consumo de energía es menor en el escenario donde se maneja una temperatura de vaporación de  $-5^{\circ}\text{C}$  con el 20% de capacidad y sin perturbaciones debido a que en este escenario el compresor permanece menos tiempo encendido porque se demora más tiempo en ir desde la temperatura de referencia ( $-5^{\circ}\text{C}$ ) a la temperatura de referencia más la diferencia ( $-3^{\circ}\text{C}$ ).

Se puede observar como el aumento de la carga conlleva a un mayor consumo de energía tal y como suceden en todos los escenarios en donde se les impone la carga por perturbaciones.

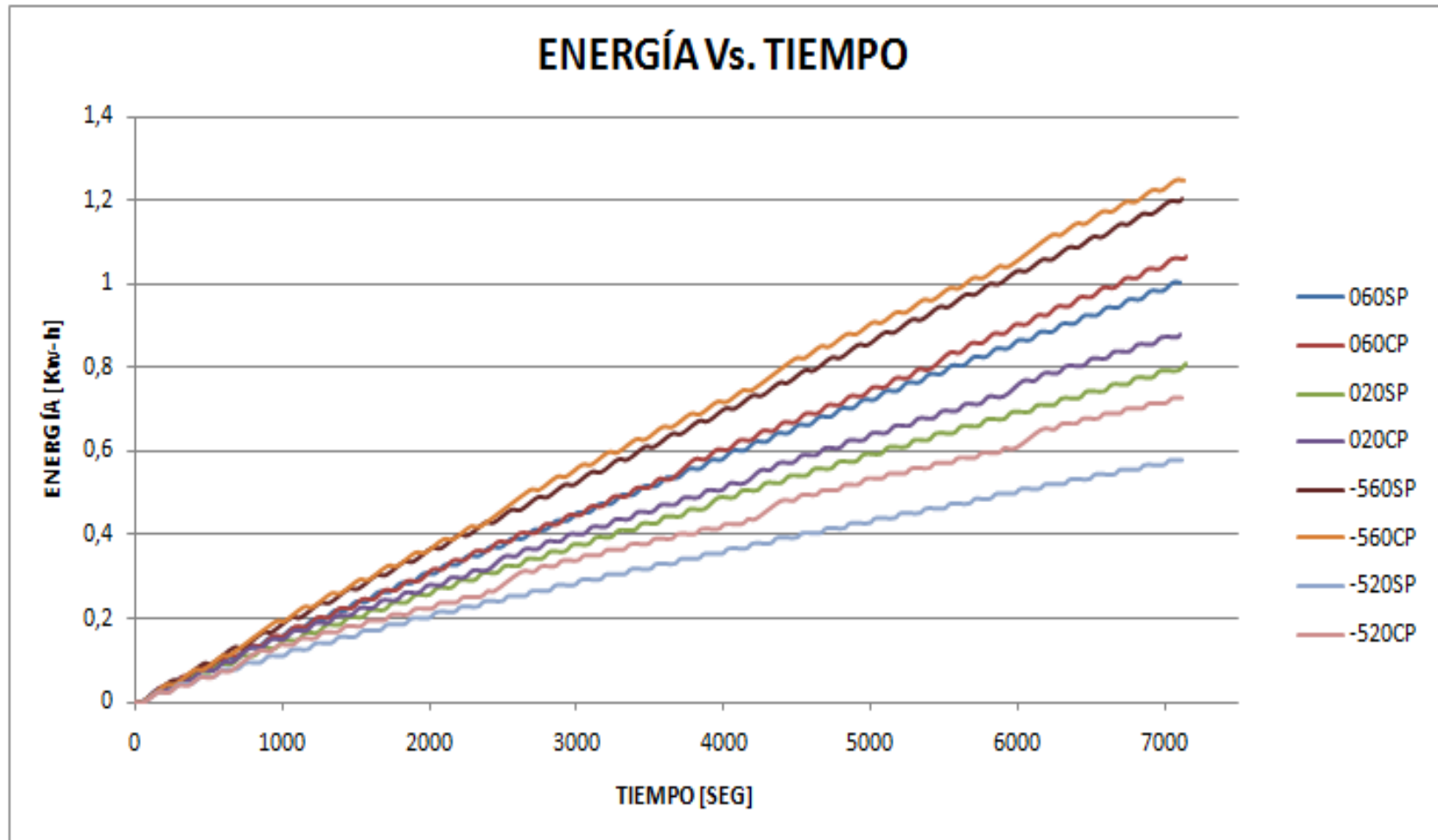
Los consumos que se obtuvieron con el control ON-OFF se encuentran en la tabla 29 y gráficamente se muestran en la figura 117.

**Tabla 29: Formato de cálculo para determinar el consumo de energía en el control ON-OFF**

TIEMPO PARA DETERMINAR LA ENERGIA						ENERGÍA TOTAL: 0,5022 Kw-h		
HORA: 06:07:53 am						COSTO DE ENERGÍA: \$137,23Kw-h		
TIEMPO DE INICIO	TIEMPO FINAL	DURACION	TIEMPO [SEG]	PRENDIDO	APAGADO	TIEMPO [HORAS]	POTENCIA [Kw]	ENERGIA INTERVALOS [Kw-h]
6:07:53	6:08:43	0:00:50	50		X	0,014	0	0,00000
6:08:44	6:10:31	0:01:47	107	X		0,030	1,04	0,03091
6:10:32	6:11:33	0:01:01	61		X	0,017	0	0,00000
6:11:34	6:13:04	0:01:30	90	X		0,025	1,04	0,02600
6:13:05	6:14:08	0:01:03	63		X	0,018	0	0,00000
6:14:09	6:15:38	0:01:29	89	X		0,025	1,04	0,02571
6:15:39	6:16:47	0:01:08	68		X	0,019	0	0,00000
6:16:48	6:18:13	0:01:25	85	X		0,024	1,04	0,02456
6:18:14	6:19:25	0:01:11	71		X	0,020	0	0,00000
6:19:26	6:20:51	0:01:25	85	X		0,024	1,04	0,02456
6:20:52	6:22:03	0:01:11	71		X	0,020	0	0,00000
6:22:04	6:23:23	0:01:19	79	X		0,022	1,04	0,02282
6:23:24	6:24:37	0:01:13	73		X	0,020	0	0,00000
6:24:38	6:25:57	0:01:19	79	X		0,022	1,04	0,02282
6:25:58	6:27:09	0:01:11	71		X	0,020	0	0,00000
6:27:10	6:28:26	0:01:16	76	X		0,021	1,04	0,02196
6:28:27	6:29:40	0:01:13	73		X	0,020	0	0,00000
6:29:41	6:30:54	0:01:13	73	X		0,020	1,04	0,02109
6:30:55	6:32:05	0:01:10	70		X	0,019	0	0,00000

Fuente: Autores.

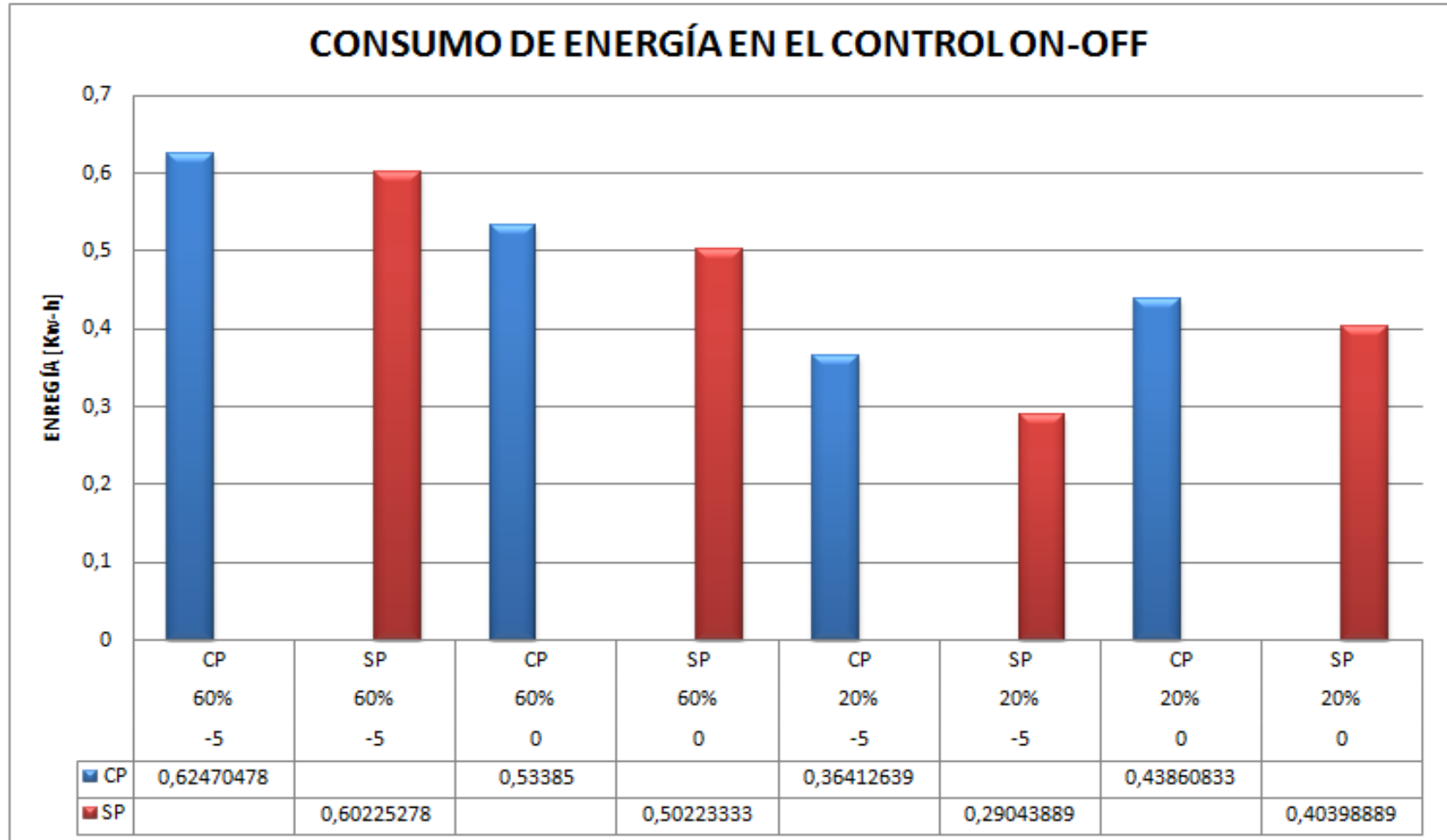
Figura 116: Consumo de energía de los diferentes escenarios en estudio con control ON-OFF



**Tabla 29: Consumo energético de los escenarios en estudio con control ON-OFF**

<b>CONTROL ON-OFF</b>			
<b>TEMPERATURA</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>PERTURBACION</b>	<b>ENERGÍA</b>
-5	60%	CP	0,6247
-5	60%	SP	0,6023
0	60%	CP	0,5339
0	60%	SP	0,5022
-5	20%	CP	0,3641
-5	20%	SP	0,2904
0	20%	CP	0,4386
0	20%	SP	0,4040

Figura 117: Comparación de los consumos energéticos de los escenarios en estudio con control ON-OFF

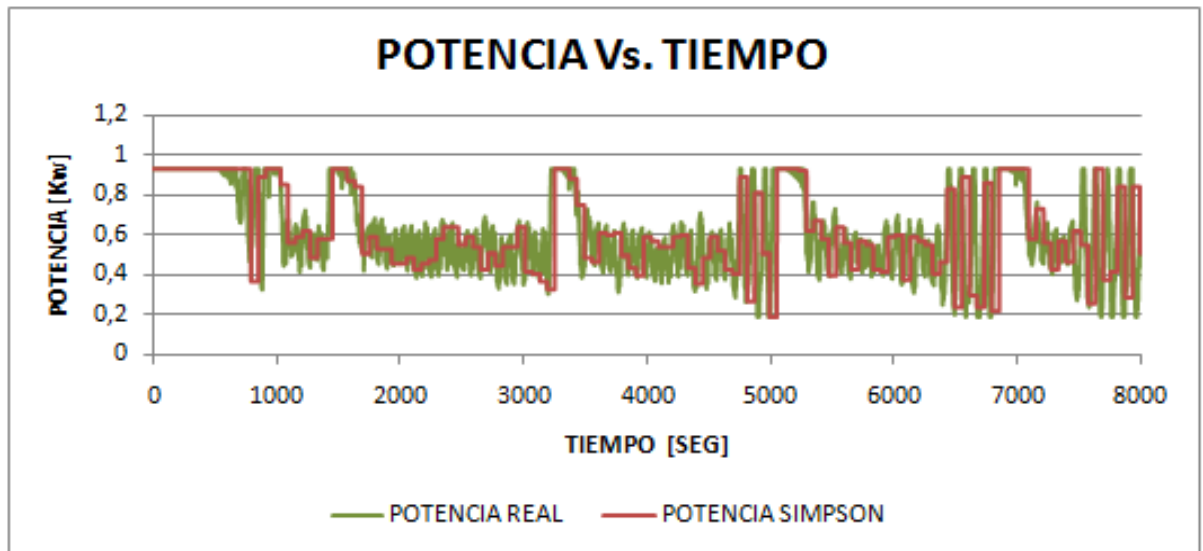


## 6.2 DETERMINACIÓN DE CONSUMO DE ENERGIA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

### 6.2.1 PID

Para calcular la energía consumida por los escenarios en estudio cuando se controlaba la temperatura de vaporación por medio del control PID se asumió que la potencia medida cada minuto por las pinzas descritas en el capítulo 2 permanecía constante durante ese intervalo de tiempo, haciendo una aproximación por medio de las reglas de simpson<sup>13</sup> (Ver figura 118).

**Figura 118: Consumo de potencia del cuarto frío con control PID a 60% a -5°C con perturbaciones**



La potencia graficada en rojo es la aproximación que se realizó. Se puede ver que el error cometido es mínimo porque unas veces la curva roja está por encima de la verde (real) y otras por debajo compensando de esta manera los valores obtenidos.

<sup>13</sup> Reglas de SIMPSON método de integración numérica que se utilizó para obtener una aproximación de la integral de la potencia en el control continuo.

Para calcular la energía consumida en cada escenario se uso la siguiente ecuación:

$$E_{int} = Pot_{int} \times t \quad (6.3)$$

$$E_{total} = \sum_{n=0}^i Pot_{int\ i} \times t = t \times \sum_{n=0}^i Pot_{int\ i} \quad (6.4)$$

Donde:

$E_{int}$ : Energía consumida en cada intervalo de tiempo, [Kw-h]

$Pot_{int}$ : Potencia consumida en cada intervalo de tiempo, [Kw].

$E_{total}$ : Energía total consumida, [Kw-h]

$t$ : Intervalo de tiempo, igual a 1min.

En la tabla 31 se puede observar el formato que se genero en Excel para determinar el consumo de energía de cada escenario escogido con control PID.

**Tabla 30: Formato de cálculo para determinar el consumo de energía en el control PID**

FILAS	CONTROL CONTINUO CON PID				
	A	B	C	D	E
1	MEDICIÓN [MIN]	TIEMPO [HORAS]	POTENCIA INTERVALO [Kw]	ENERGIA INTERVALO [Kw-h]	ENERGÍA TOTAL [Kw-h]
2	MINUTOS	=1/60	MEDIDA	=B*C	= SUMA (D3:D123)/2
3	0	0,01667	0,509	0,00848333	0,41378333
4	1	0,01667	0,567	0,00945	
5	2	0,01667	0,344	0,00573333	
6	3	0,01667	0,482	0,00803333	
7	4	0,01667	0,509	0,00848333	
8	5	0,01667	0,536	0,00893333	
9	6	0,01667	0,373	0,00621667	
10	7	0,01667	0,227	0,00378333	
11	8	0,01667	0,570	0,0095	

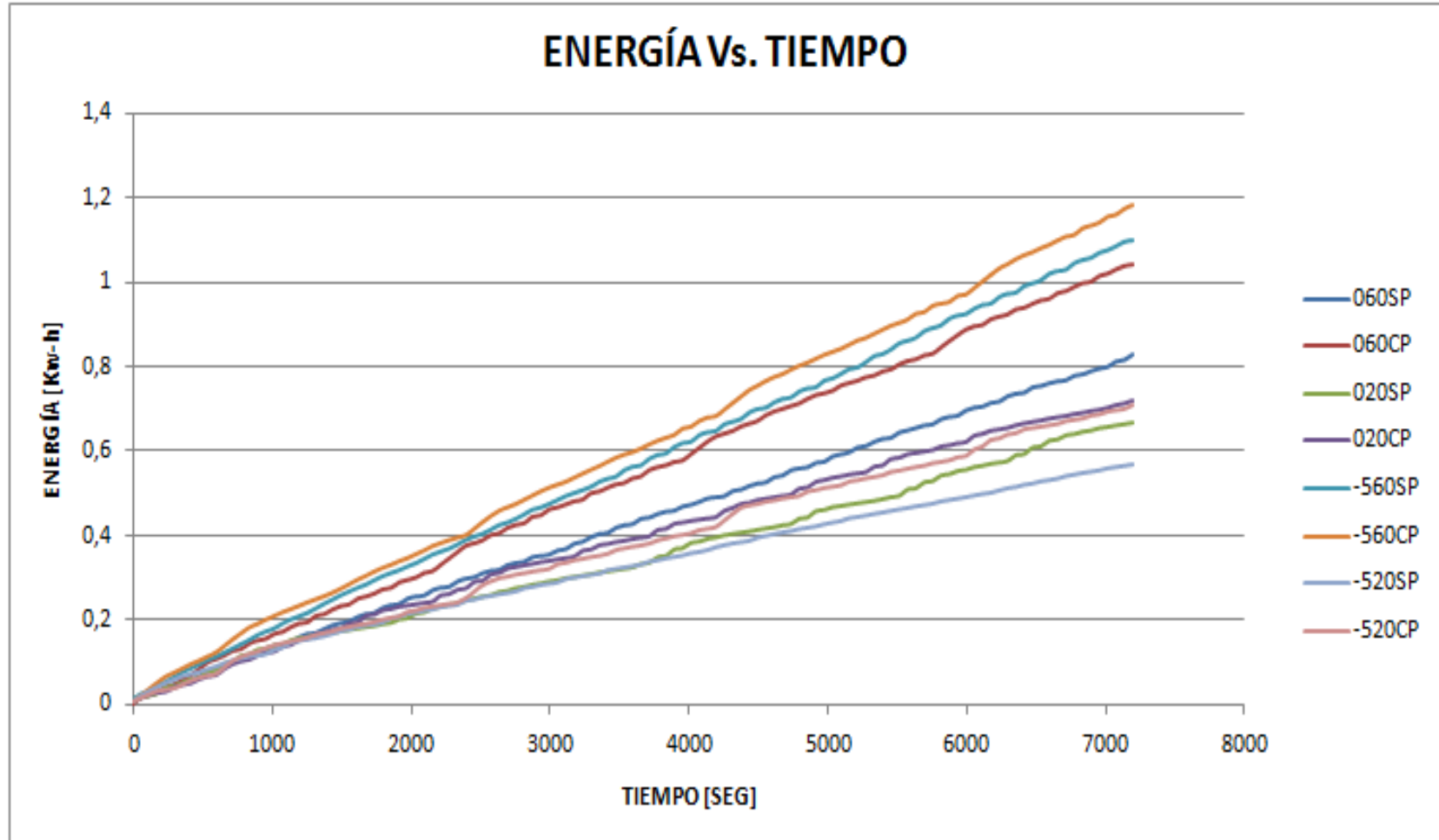
Fuente: Autores.

En la figura 119 se puede ver los consumos de energía cuando la temperatura de evaporación es controlada con el PID, los cuales se reducen en comparación con los consumos del anterior control (ON-OFF) mostrados en la grafica 116. Se puede observar que al igual que en el control ON-OFF el escenario que consume mayor energía es el de más baja temperatura de vaporación (-5°C) con mas carga (60% y perturbaciones).

Debido a que el control de temperatura no presenta el mismo comportamiento a baja carga para 0°C y -5°C se presenta un aumento del consumo de energía en el escenario de 0°C producto de las oscilaciones del control, dando como conclusión que se consume más energía con carga baja (20%) a una temperatura alta (0°C) que a una temperatura baja (-5°C) producto de la sintonización del PID más no por efectos termodinámicos, ya que en la realidad hay mayor consumo cuando la temperatura de vaporación es más baja. Para poder controlar mejor la temperatura de vaporación de 0°C se tendría que disminuir el límite inferior del rango de salida del PID (2-10V) pero afectaríamos el funcionamiento del compresor como tal por las bajas velocidades a las que trabajaría el mismo.

En la tabla 32 se encuentra un resumen del consumo de energía obtenido en una hora en los diferentes escenarios en estudio cuando el control de la temperatura de vaporación se realizo con el control PID. Estos datos se pueden ver gráficamente en la figura 120.

Figura 119: Consumo de energía en los escenarios de estudio con control PID

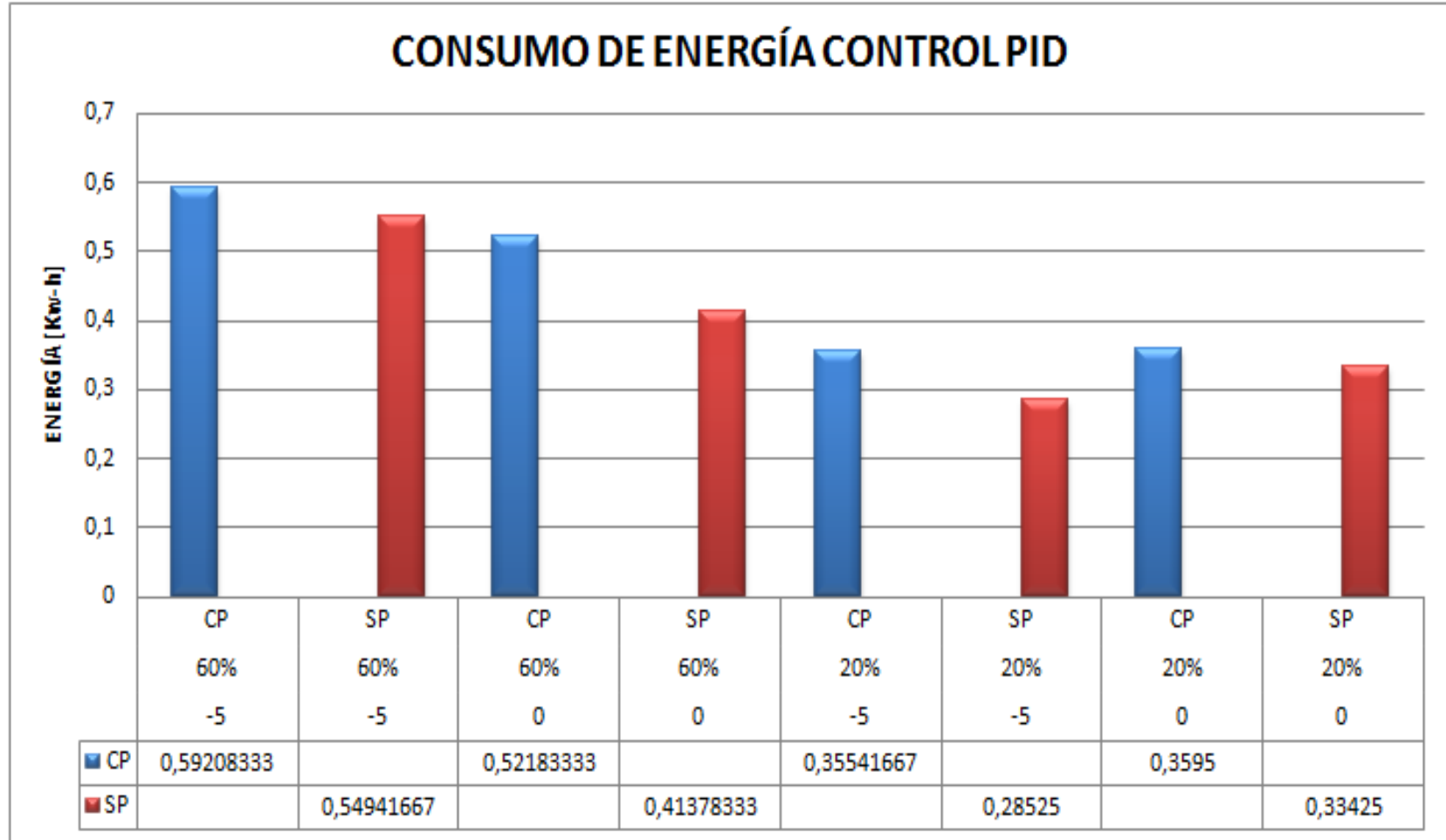


**Tabla 31: Consumo energético de los escenarios en estudio con control PID**

TEMPERATURA	CAPACIDAD	PERTURBACION	ENERGÍA
-5	60%	CP	0,5921
-5	60%	SP	0,5494
0	60%	CP	0,5218
0	60%	SP	0,4138
-5	20%	CP	0,3554
-5	20%	SP	0,2853
0	20%	CP	0,3595
0	20%	SP	0,3343

Fuente: Autores.

Figura 120: Comparación de los consumos energéticos de los escenarios en estudio con control PID



## 6.2.2 LOGICA FUZZY

Para calcular el consumo de energía de los escenarios en estudio cuando se usaba control FUZZY se uso el mismo método y ecuaciones que para el PID.

En la tabla 33 se puede observar el archivo que se genero en Excel para determinar el consumo energético del control continuo con lógica fuzzy en los diferentes escenarios en estudio. Para lógica fuzzy solamente se estaba manejando el escenario de la temperatura de vaporación de 0°C.

**Tabla 32: Formato de cálculo para determinar el consumo de energía en el control FUZZY**

FILAS	CONTROL CONTINUO CON LOGICA FUZZY				
	A	B	C	D	E
1	MEDICIÓN [MIN]	TIEMPO [HORAS]	POTENCIA INTERVALO [Kw]	ENERGIA INTERVALO [Kw-h]	ENERGÍA TOTAL [Kw-h]
2	MINUTOS	=1/60	MEDIDA	=B*C	= SUMA (D3:D123)/2
3	0	0,01667	0,32	0,00533333	0,38941667
4	1	0,01667	0,32	0,00533333	
5	2	0,01667	0,35	0,00583333	
6	3	0,01667	0,35	0,00583333	
7	4	0,01667	0,60	0,01	
8	5	0,01667	0,60	0,01	
9	6	0,01667	0,60	0,01	
10	7	0,01667	0,32	0,00533333	
11	8	0,01667	0,32	0,00533333	
12	9	0,01667	0,32	0,00533333	
13	10	0,01667	0,35	0,00583333	

Fuente: Autores.

Este control presenta consumos de energía bajos debidos en gran parte a que no es tan sensible como el control PID. Se puede ver en la figura 121 que el escenario que maneja mayor consumo de energía es el que tiene mayor carga, es decir, al 60% de la capacidad y con perturbaciones para una temperatura de vaporación dada. Por otro lado, el escenario que menor consumo tiene con el control fuzzy es el de menor carga que se da al 20% de la capacidad y sin perturbaciones.

En la tabla 34 se presenta un resumen de los consumos de energía en los escenarios controlados con el control fuzzy y gráficamente se pueden ver en la figura 122.

**Tabla 33: Consumo energético de los escenarios en estudio con control FUZZY**

TEMPERATURA [°C]	CAPACIDAD	PERTURBACION	ENERGÍA [Kw-h]
0	60%	CP	0,5083
0	60%	SP	0,3894
0	20%	CP	0,3393
0	20%	SP	0,3297

Figura 121: Consumo de energía en los escenarios de estudio con control PID

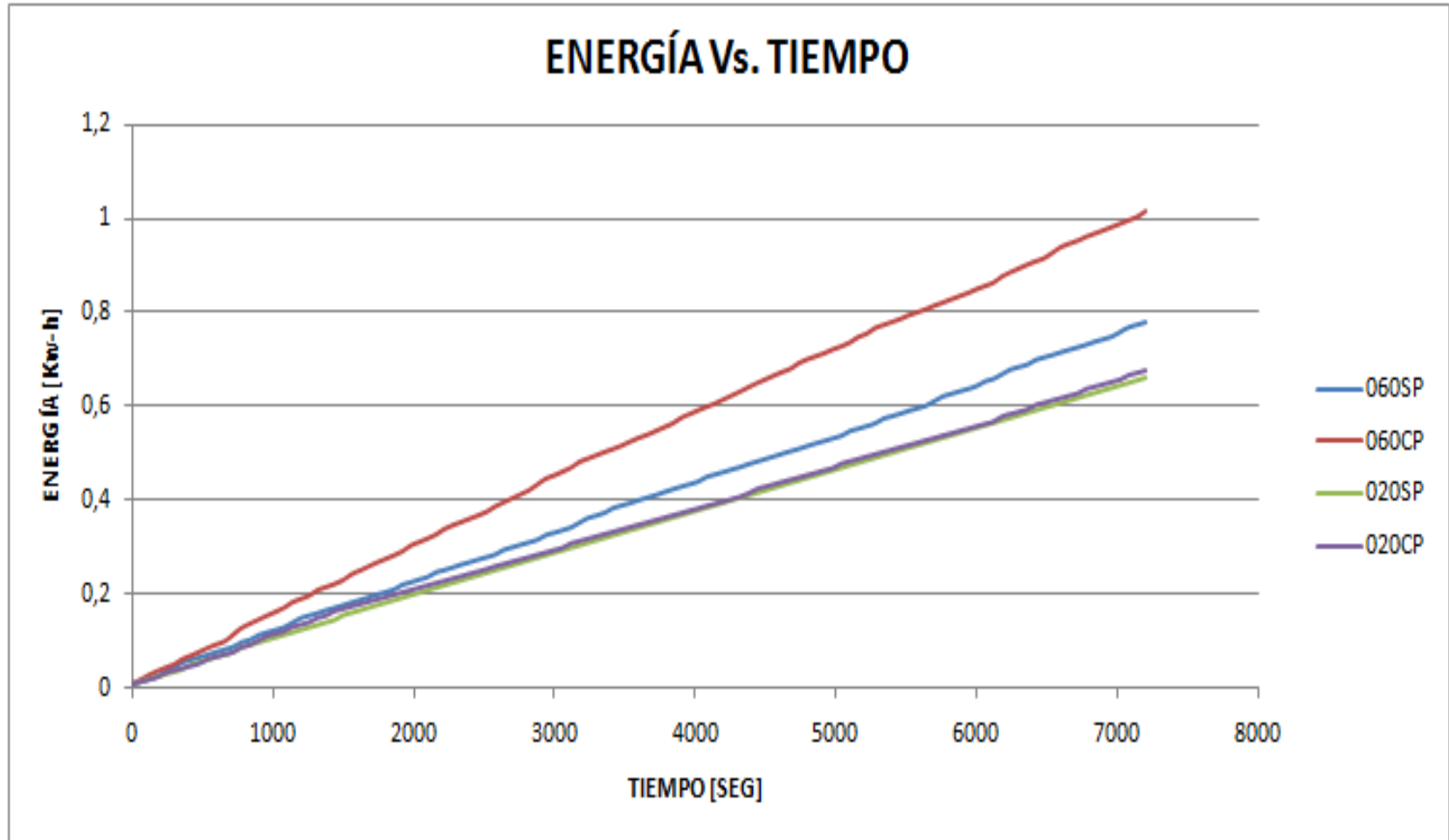
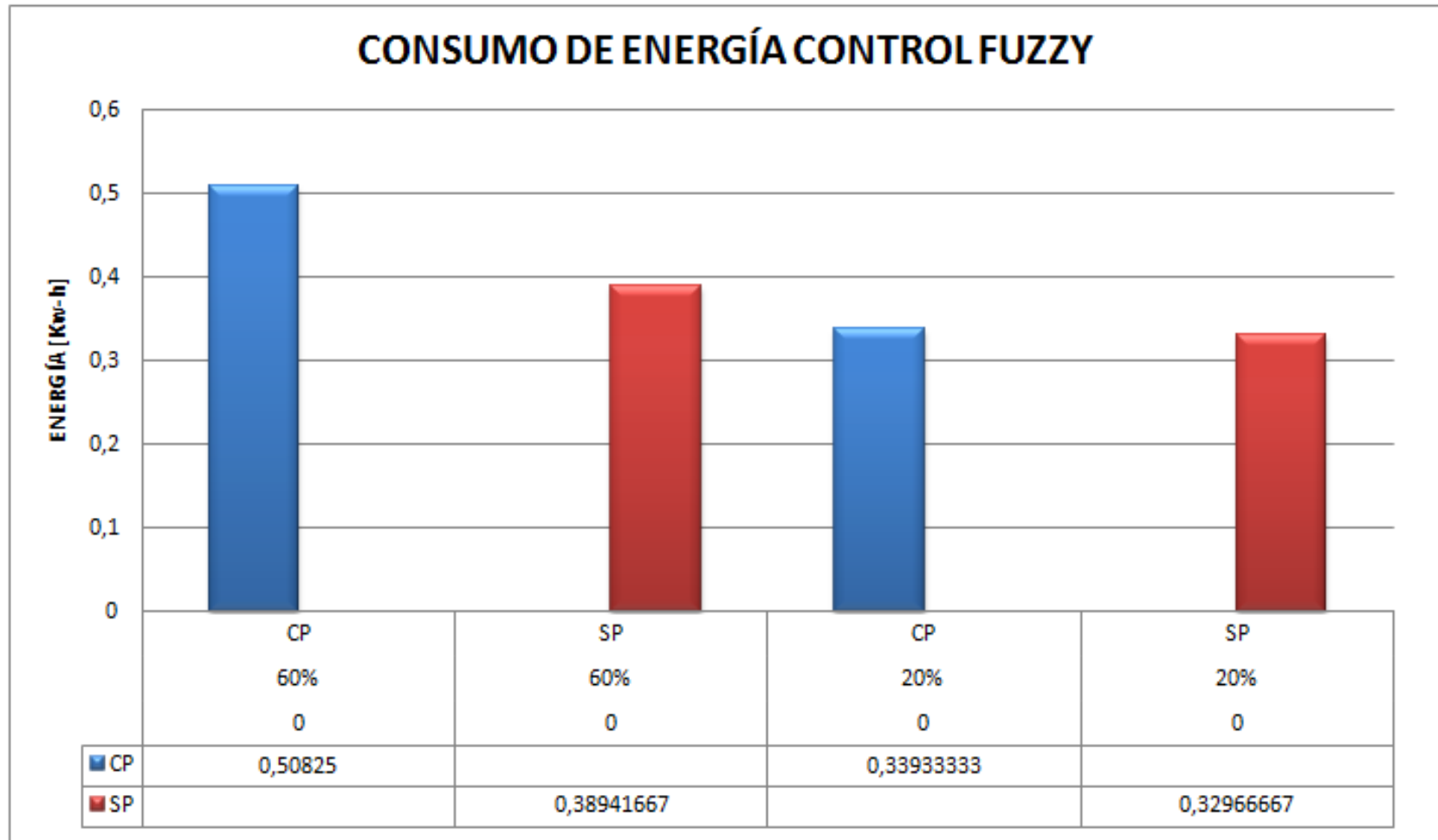


Figura 122: Comparación de los consumos energéticos de los escenarios en estudio con control FUZZY



### 6.3 COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL IMPLEMENTADAS

La energía consumida por las dos estrategias de control implementadas en el cuarto frío del laboratorio de refrigeración arrojó diferentes consumos de energía como se esperaba, consumiendo más energía el control ON-OFF, seguido del PID y por último el FUZZY.

Dentro de los resultados resumidos y presentados en la tabla 35 se puede concluir:

- ✓ A menor temperatura de vaporación y mayor capacidad el consumo de energía es mayor, por eso da mayor consumo en el escenario de 60% de capacidad a  $-5^{\circ}\text{C}$  y con perturbaciones.
- ✓ Para una temperatura y capacidad dada el efecto de las perturbaciones sobre el consumo de energía es un aumento de la misma.
- ✓ Para temperaturas de vaporación altas y bajas cargas se debe presentar menor consumo de energía.
- ✓ El control ON-OFF consume más energía que los otros dos controles debido a que no tiene manera de regular las RPM a la capacidad impuesta al sistema en determinado momento.

A continuación se presentan las graficas de los diferentes controles para un mismo escenario donde se puede ver el efecto que tiene el mismo en el consumo de energía.

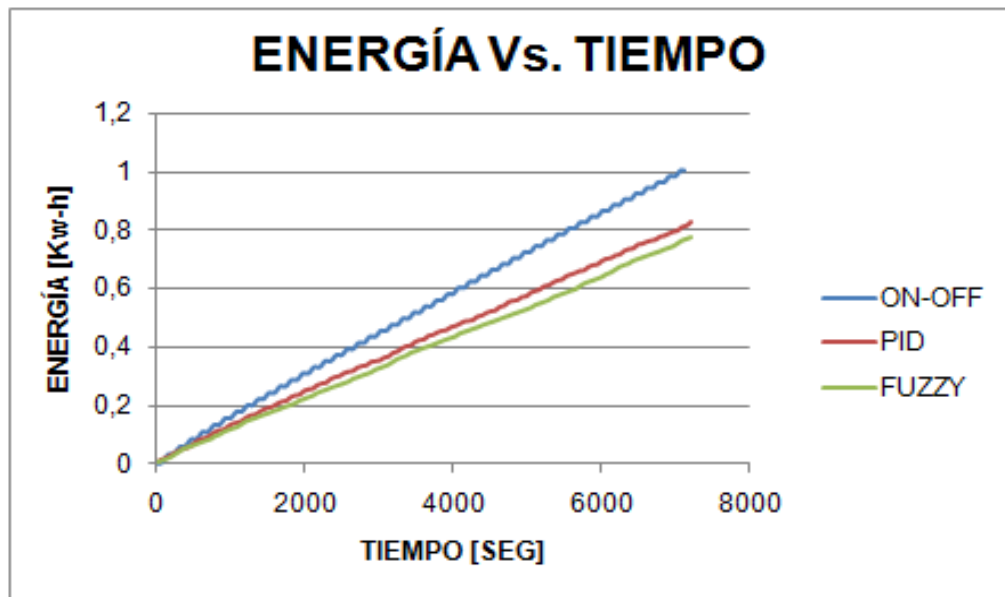
En la figura 123 se ve que el porcentaje de ahorro entre el control ON-OFF y el control continuo es más marcado, que el que se presenta en los dos controles continuos PID y FUZZY.

**Tabla 34: Comparación de los consumos energéticos de los escenarios en estudio con control continuo y control ON-OFF**

ESCENARIOS DE ESTUDIO DEL CONSUMO DE ENERGÍA					
TEMPERATURA	CAPACIDAD	PERTURBACION	ON-OFF	PID	FUZZY
-5	60%	CP	0,6247	0,5921	-----
-5	60%	SP	0,6023	0,5494	-----
0	60%	CP	0,5339	0,5218	0,5083
0	60%	SP	0,5022	0,4138	0,3894
-5	20%	CP	0,3641	0,3554	-----
-5	20%	SP	0,2904	0,2853	-----
0	20%	CP	0,4386	0,3595	0,3393
0	20%	SP	0,4040	0,3343	0,3297

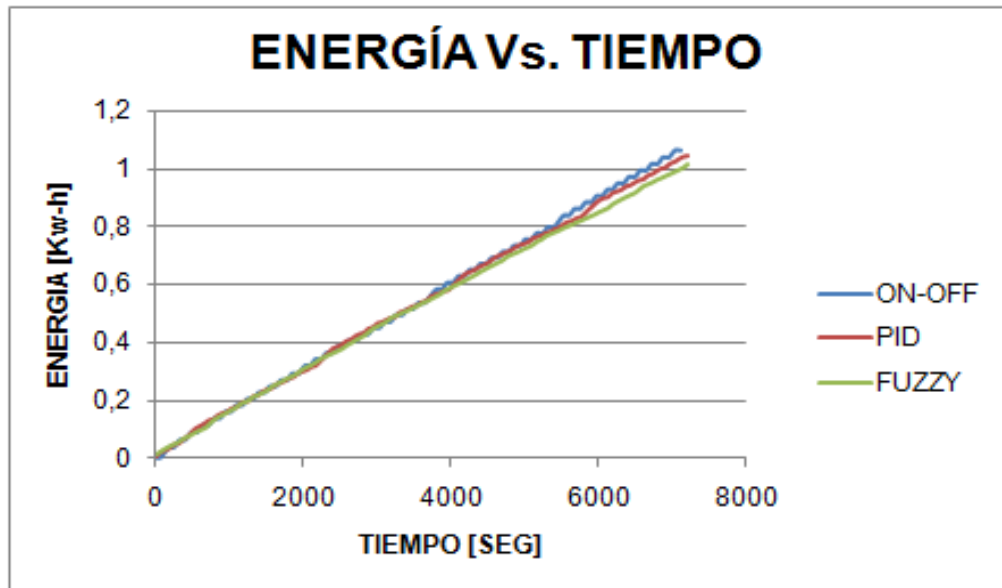
Fuente: Autores.

**Figura 123: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 60% a 0°C sin perturbaciones**



En la figura 124 se puede ver que las perturbaciones a alta carga y alta temperatura de vaporación disminuyen la diferencia de consumo que hay entre los tres controles, manteniéndose las curvas de energía muy cercanas.

**Figura 124: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 60% a 0°C con perturbaciones**



En la figura 125 se puede observar que el ahorro de energía entre el control continuo y ON-OFF a baja carga se sigue, pero entre los controles continuos PID y FUZZY esta diferencia se hace muy mínima lo que indica que estos controles se comportan igual a carga baja.

Cuando se maneja baja carga pero se le adiciona las perturbaciones las curvas de energía de los tres controles manejados si se pueden diferenciar como se ve en la figura 126, lo que no ocurre en la figura 124.

En las figuras 127 y 128 se puede ver claramente el mayor consumo que hay en la estrategia de control ON-OFF con respecto a la de control continuo cuando se maneja carga alta y una temperatura de vaporación baja. Mientras que cuando se maneja carga baja el consumo de ambas estrategias es muy parecido, estando el consumo de energía del control ON-OFF ligeramente por encima del control PID como sucede en las figuras 129 y 130.

Figura 125: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 20% a 0°C sin perturbaciones

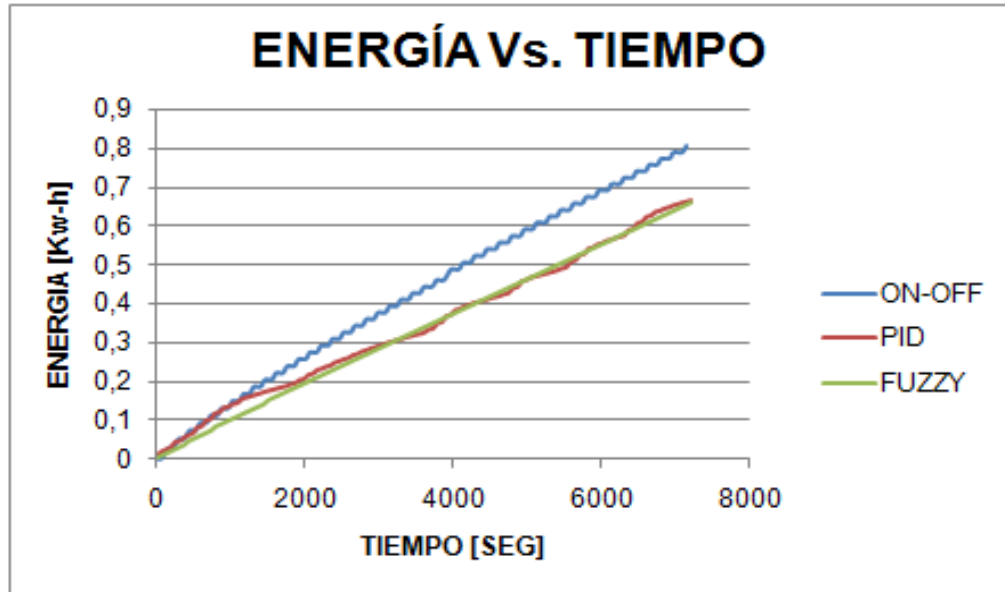


Figura 126: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 20% a 0°C con perturbaciones

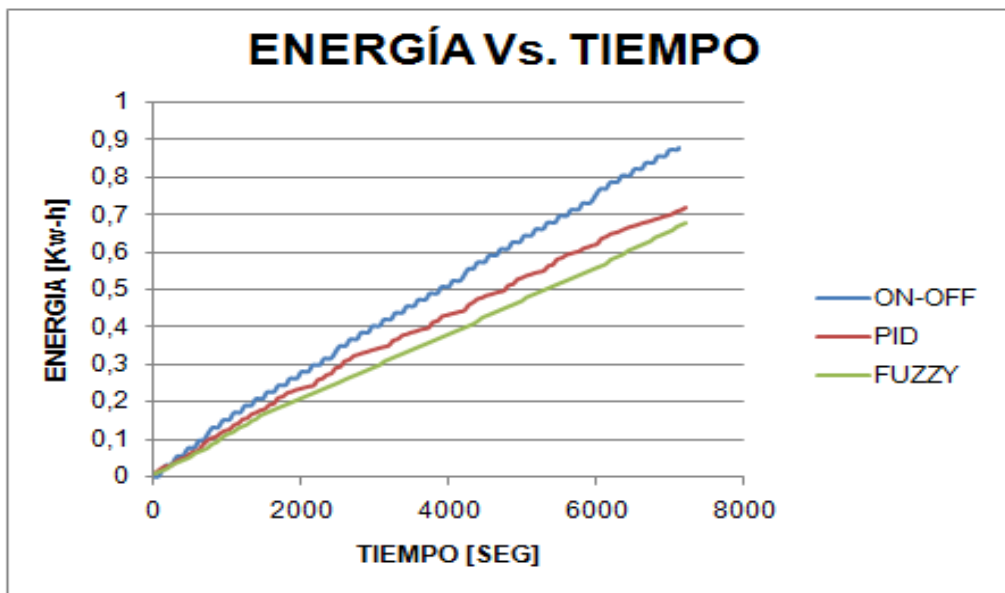


Figura 127: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 60% a -5°C sin perturbaciones

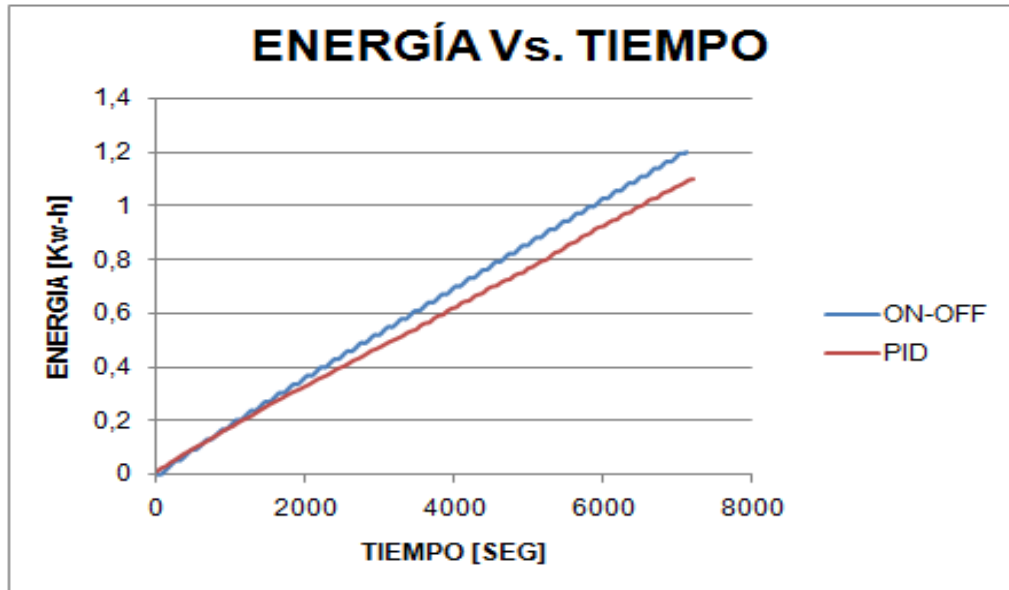


Figura 128: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 60% a -5°C con perturbaciones

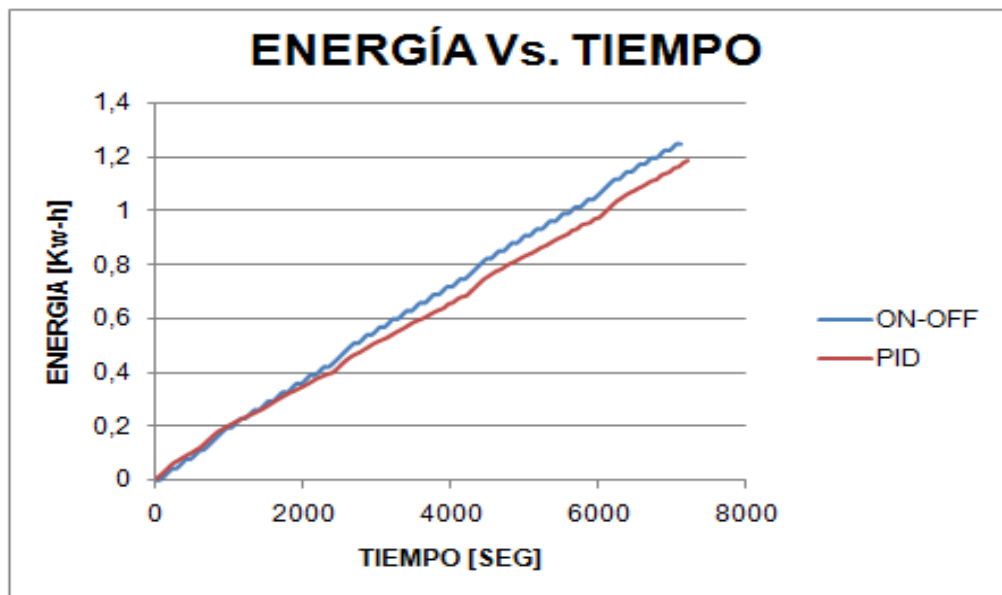


Figura 129: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 20% a -5°C sin perturbaciones

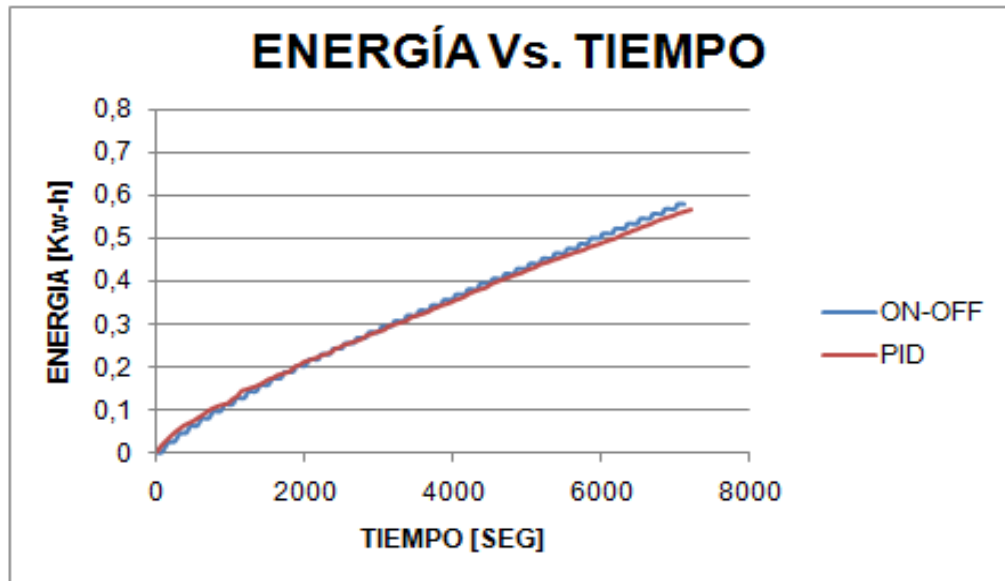
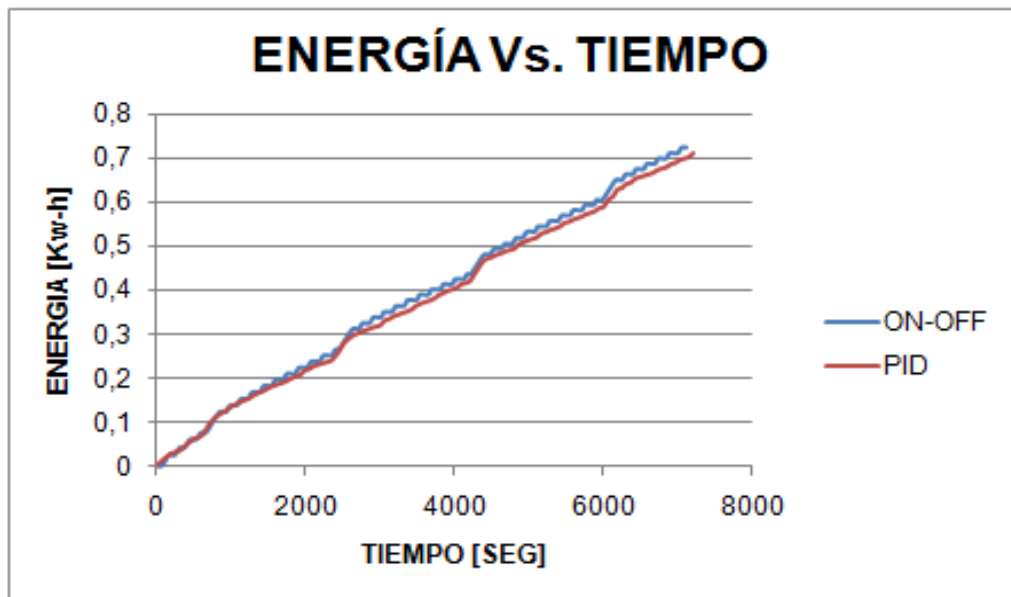
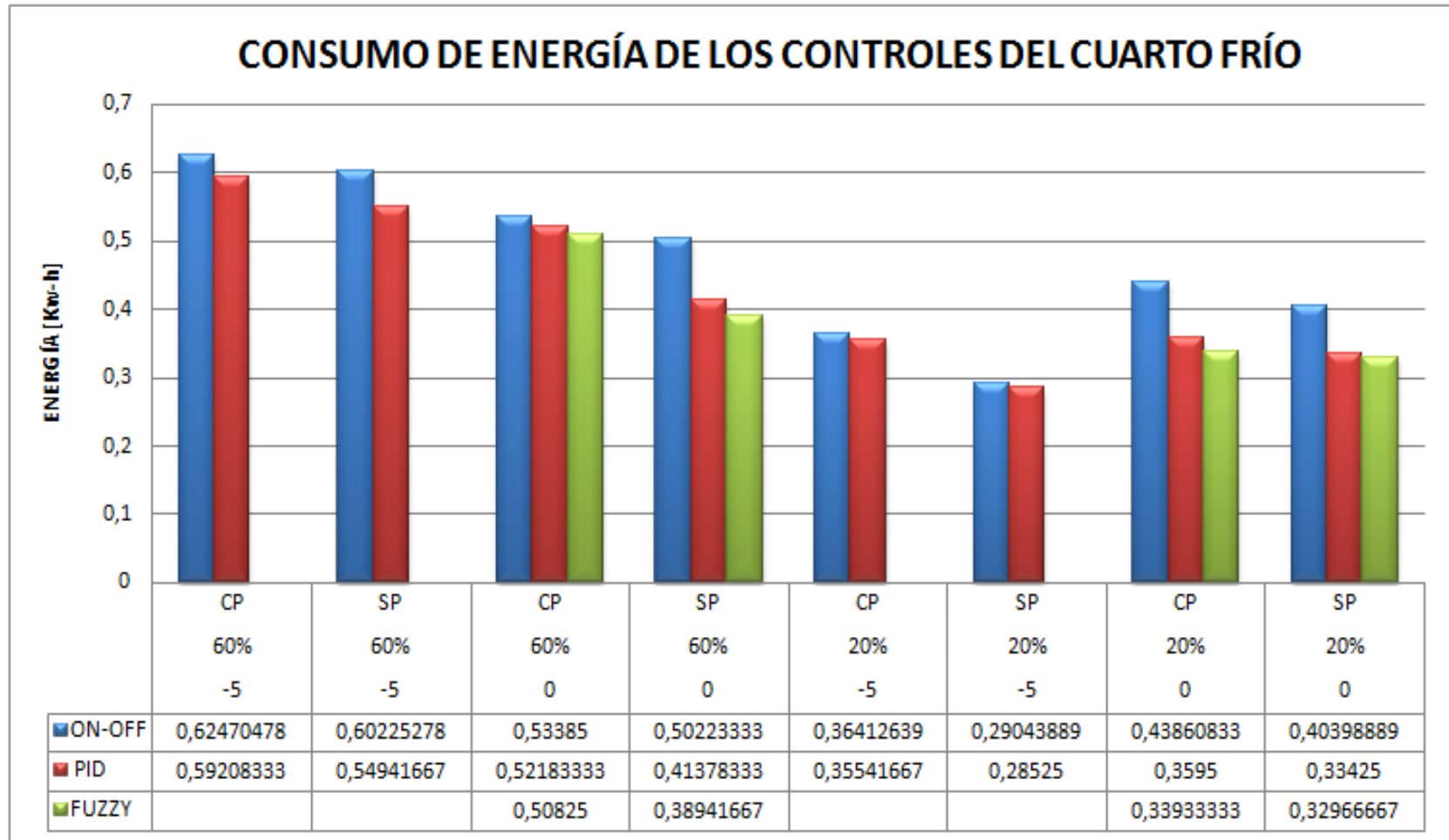


Figura 130: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío 20% a -5°C con perturbaciones



Finalmente la energía consumida con cada control en los escenarios escogidos para este estudio se presenta gráficamente en la figura 131 y los ahorros energéticos en la tabla 36.

Figura 131: Comparación del consumo de energía para los controles del cuarto frío



**Tabla 35: Porcentajes de ahorro de energía entre los diferentes controles implementados para el estudio energético del cuarto frío**

TEMPERATURA	CAPACIDAD	PERTURBACIÓN	CONSUMO DE ENERGÍA			AHORROS		
			ON-OFF	PID	FUZZY	% AHORRO PID Vs. ON-OFF	% AHORRO FUZZY Vs. ON-OFF	% AHORRO FUZZY Vs. PID
-5	60%	CP	0,62470	0,59208	-----	5,22	-----	-----
-5	60%	SP	0,60225	0,54942	-----	8,77	-----	-----
0	60%	CP	0,53385	0,52183	0,50825	2,25	4,80	2,60
0	60%	SP	0,50223	0,41378	0,38942	17,61	22,46	5,89
-5	20%	CP	0,36413	0,35542	-----	2,39	-----	-----
-5	20%	SP	0,29044	0,28525	-----	1,79	-----	-----
0	20%	CP	0,43861	0,35950	0,33933	18,04	22,63	5,61
0	20%	SP	0,40399	0,33425	0,32967	17,26	18,40	1,37

## CONCLUSIONES

- Como una condición previa para la realización del objetivo principal se adecuo y optimizo el cuarto frío del laboratorio de refrigeración de la Escuela de Ingeniería Mecánica cambiando la caja de control, haciendo carga de refrigerante, colocando válvula de servicio, termocuplas y autotransformador variable para un mejor funcionamiento del mismo.
- Para el monitoreo y control del sistema de refrigeración en estudio se implemento un programa mediante el software LabVIEW (Entorno grafico de programación) y hardware de control Field Point (sistema de adquisición de datos y control de National Instrument).
- La comparación entre las estrategias de control implementadas (ON-OFF, PID y FUZZY) para la determinación del consumo energético del cuarto frío permitieron establecer que:
  - a. El control continuo logra un ahorro energético respecto al control ON-OFF, debido a que brinda al compresor la posibilidad de funcionar a diferentes frecuencias y por lo tanto a diferentes RPM para adaptarse a la carga impuesta al sistema sin variar la temperatura de vaporación a la cual se esté realizando el control.
  - b. Reemplazando un control ON-OFF por un control continuo PID se obtiene porcentajes de ahorro de energía que oscilan entre el 1.77% y el 18.03%.
  - c. Cuando se controlan sistemas de refrigeración con controles Fuzzy se pueden obtener porcentajes de ahorro de hasta el 22.64% respecto al control ON-OFF.

- d. El control continuo FUZZY permite un mayor ahorro de energía con respecto al control continuo PID en porcentajes que oscilan entre el 1.37% y el 5.87%.
  - e. Comparando los tres tipos de control ON-OFF, PID y lógica Fuzzy se da un menor consumo energético en el control fuzzy debido a que su control presenta menor oscilación en la señal de salida lo que genera más estabilidad en las RPM manejadas para mantener constante la temperatura de vaporación.
- Respecto a los escenarios escogidos para la operación y realización de pruebas del cuarto frío, se concluye que:
- a. Cuando se manejan cargas altas, simuladas por la capacidad al 60% con perturbaciones y temperaturas de vaporación bajas ( $-5^{\circ}\text{C}$ ) se da un mayor consumo de energía sea cual sea el control usado, especialmente en el control ON-OFF.
  - b. En el control de la temperatura de vaporación a cargas bajas en este caso manejado con el escenario de capacidad 20% sin perturbaciones fue más difícil mantener esta temperatura constante debido a que este porcentaje de carga es muy bajo y el compresor necesita funcionar a una frecuencia muy baja (menor a 12Hz), lo que genera problemas de vibraciones, ruido, lubricación y eléctricos en el compresor.
  - c. Se pudo observar que cuando se hace control sobre la temperatura de vaporación implícitamente se está controlando la temperatura del cuarto frío pues el comportamiento que las temperaturas presentan es el mismo, ya sea una oscilación entre dos límites en el caso del control ON-OFF o manteniéndose relativamente constante en un valor cuando se usa control continuo.

- d. El control ON-OFF a bajas cargas produce tiempos de encendidos del compresor muy cortos que tienden a producir más desgaste en el compresor debido a los ciclos de arranque y parada a los que está sometido, especialmente si se trabaja con una temperatura de vaporación más baja.
  - e. En los escenarios en donde se imponen cargas por perturbaciones en el sistema aumenta el consumo de energía debido al aumento por carga que esto ocasiona al sistema de enfriamiento.
  - f. La sintonización del control continuo PID, influye notoriamente en el consumo de energía de esta estrategia, más cuando se están manejando bajas cargas, es por eso que el consumo de energía a una temperatura de vaporación de  $0^{\circ}\text{C}$  da mayor que a una de  $-5^{\circ}\text{C}$  cuando se trabaja con una capacidad del 20%, debido a que se presenta mayor oscilación de la temperatura de vaporación respecto a la referencia.
  - g. En el control continuo PID de la temperatura de vaporación a bajas cargas las perturbaciones ayudan a tener un mejor control de la temperatura de vaporación debido a que la perturbación tiene un incremento temporal de carga y el compresor ya no necesita trabajar a tan bajas RPM.
  - h. En el control continuo PID de la temperatura de vaporación a baja carga no se puede mantener la temperatura de vaporación igual a  $0^{\circ}\text{C}$  porque el compresor necesita funcionar a menor frecuencia ( $< 2\text{V}$ ) por ende menor RPM para mantener a esa carga la temperatura de vaporación lo que es impedido por el límite inferior del rango de salida del PID.
- La sintonización del control continuo PID para las diferentes cargas parciales (20% y 60%) debe presentar valores de constantes  $k_i, T_i, T_d$  diferentes para obtener una buena respuesta del control, para nuestro caso se manejaron iguales constantes, presentando algunas dificultades en la

respuesta de la carga más baja lo cual se reflejó en el consumo de energía de los datos obtenidos.

- Comparando este estudio energético con el anteriormente realizado<sup>14</sup> se obtuvo porcentajes de ahorro energéticos entre la estrategia de control continuo y la estrategia de control ON-OFF más cercanos a la realidad entre el 1.77% y 22.4%, pues anteriormente se habían encontrado porcentajes de ahorro que oscilaban entre el 400% y 90%.
- Los porcentajes de ahorro energético encontrados en este estudio que están entre el 1.775% y el 22.4%, corresponden a la realidad en donde se han logrado conseguir ahorros del 30% en instalaciones frigoríficas que manejan alto desarrollo tecnológico<sup>15</sup>.
- Con este estudio queda demostrado que si en todos los sistemas de refrigeración se implementaran estrategias de control continuo se estaría contribuyendo al ahorro de energía y por ende a la disminución de los problemas ambientales que hay en el mundo, especialmente el calentamiento global que hoy en día nos aqueja.

---

<sup>14</sup> Cuantificación del ahorro energético al utilizar una estrategia de control continuo con respecto a la utilización de una estrategia de control ON-OFF, para un sistema de refrigeración. Fernando Corredor Neira.

<sup>15</sup> Página de internet, TODOPRODUCTIVIDAD.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda leer el anexo C de funcionamiento del programa de monitoreo y control del cuarto frío, antes de ejecutar el programa.
- Se recomienda realizar una mejora en la sintonización de los controles continuos PID y lógica Fuzzy para próximos estudios especialmente si se requiere trabajar con bajas cargas.
- Se recomienda realizar un estudio sobre la influencia de la oscilación de la señal de salida del controlador PID y Fuzzy sobre el consumo energético de un sistema de refrigeración.
- Para mayor precisión en la toma de datos de las variables eléctricas se recomienda la adquisición de un analizador trifásico debido a que este permite obtener segundo a segundo el valor de las mismas y a su vez el almacenamiento de todos los datos obtenidos.

## BIBLIOGRAFÍA

**AREVALO R., Orlando Rafael, SAJONERO P., Luis Fernando.** Manual Básico LabVIEW 5.0. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

**CORREDOR NEIRA Fernando.** Cuantificación del Ahorro Energético al Utilizar una Estrategia de Control Continuo con Respecto a la Utilización de una Estrategia de Control ON-OFF, para un Sistema de Refrigeración. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2004.

**DOSSAT Roy J.** Principios de Refrigeración. Compañía Editorial Continental SA. de C.V. México, 1998.

**LAZARO, Manuel Antonio.** LabVIEW, Programación Gráfica para el Control de Instrumentación. International Thomson Editores Spain Paraninfo, S.A., 2001.

**PÁEZ MARTÍNEZ José Pablo, OSORIO GARCÍA Alfredo Cristóbal.** Diseño e Implementación de una Válvula de Expansión de Flujo de Refrigerante con Control Electrónico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2008.

**PITA G. Edward.** Acondicionamiento de Aire, Principios Sistemas. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. México, 1994.

**RAPIN P.J., JACQUARD P.** Instalaciones Frigoríficas. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., Tomo 2. México, 2001.

**RAPIN, Pierre, JACQUARD, Patrick.** Formulario del Frío. Alfaomega Grupo Editor, S. A. de C.V. México, 1999.

## **PAPERS:**

**Aprea C, Mastrullo R, Renno C.** Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant. Tomado del ELSEVIER, 2004. P 639-648.

**Pinzón M., Mauricio, Gauthier, Alain.** Una Comparación del Control Difuso con Respecto a los Controladores Convencionales. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes. Bogotá.

**Unezaki F, Anzai Y, Ikeda T, Matsuoka F.** Energy saving refrigeration system for supermarket. Tomado de la IEEE, 2005. P 482-483.

**Wicks Frank.** 2nd Law analysis of ON/OFF vs frequency modulation control of a refrigerator. Tomado de la IEEE, 2000. P 340-344.

## **ANEXOS**

**ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS DE LOS COMPONENTES DEL CUARTO FRÍO  
DEL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN  
:**

1. Ficha técnica de la cámara de enfriamiento.

	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	<b>CODIGO:01</b>	<b>FICHA: 1/12</b>	
	<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>	<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>		
		<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M		
<b>FICHA TECNICA DE LA CAMARA DE ENFRIAMIENTO</b>				
<b>FABRICANTE:</b> PROYECTO DE GRADO CUARTO FRIO CON FINES DIDACTICOS. DISEÑO,CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA		<b>CAMARA DE ENFRIAMIENTO</b>		
<b>CARACTERISTICAS</b>				
<b>MATERIAL AISLANTE:</b> POLIURETANO ( $K = 0.17 \frac{Btu}{ft-F}$ )				
<b>ESPESOR DE LAS PAREDES:</b> 4in (.1016m)				
<b>DIMENSIONES:</b>				
<b>ALTO:</b> 2.075 m	<b>ANCHO:</b> 1.180 m			<b>LARGO:</b> 2.110m
<b>ÁREA DE TRANSFERENCIA POR PARED:</b> 15.793 m <sup>2</sup>				
<b>VOLUMEN INTERNO:</b> 3.45 m <sup>3</sup>				
<b>MATERIAL DE LOS MODULOS:</b> LAMINA GALVANIZADA CALIBRE 22				
<b>POTENCIA DE ILUMINACIÓN:</b> 100 WATTS				



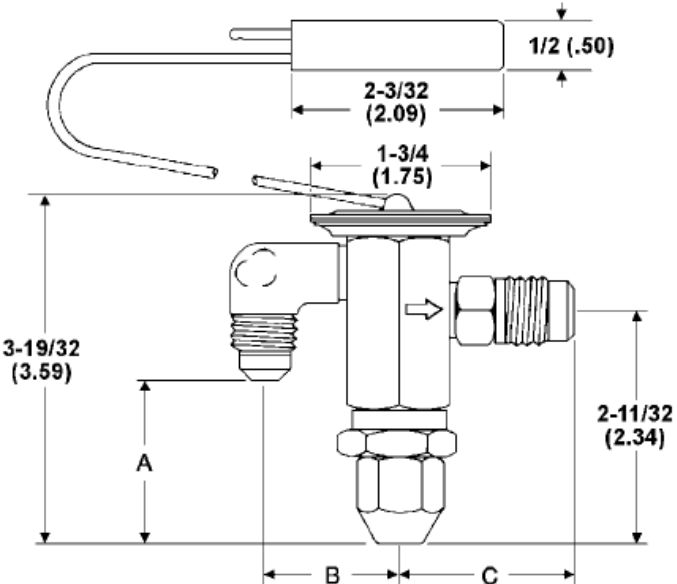
## 2. Ficha técnica del compresor.

		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> <b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>		<b>CODIGO:03</b>		<b>FICHA: 2/12</b>	
				<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>			
<b>FICHA TECNICA DEL COMPRESOR</b>							
<b>CARACTERISTICAS</b>				<b>COMPRESOR</b>			
<b>MARCA: COPELAND</b>		<b>MODELO: CS12K6E-TF5-551</b>					
<b>SERIE: 01E82941H</b>		<b>TIPO: HERMÉTICO</b>					
<b>CAPACIDAD: 12000 Btu/h</b>		<b>REFRIGERANTE: R-134a</b>					
<b>POTENCIA: 1.8 HP</b>		<b>LUBRICANTE SINTETICO: POLYOY ESTER</b>					
<b>PH: 3</b>		<b>FASES: 3</b>					
<b>CANTIDAD DE LUBRICANTE: 2 LITROS</b>		<b>MARCA DE LUBRICANTE: KRUNER</b>					
<b>RENDIMIENTO</b>							
<b>EVAP (°F)/COND (°F)</b>		<b>45/130</b>		<b>20/120</b>		<b>LRA: 51</b>	
<b>RG (°F)/LIQ (°F)</b>		<b>65/130</b>		<b>65/120</b>		<b>RLA: 7.5 Selección de contactor</b>	
<b>CAPACIDAD (BTU/H)</b>		<b>13600</b>		<b>7300</b>		<b>MCC: 10.5 Amps</b>	
<b>POTENCIA (WATTS)</b>		<b>1430</b>		<b>989</b>		<b>RLA: 6.7 Selección del breaker</b>	
<b>CORRIENTE (AMPS)</b>		<b>4.4</b>		<b>3.8</b>		<b>RPM: 1800</b>	
<b>EER (BTU/WH)</b>		<b>9.5</b>		<b>74</b>		<b>RPM: 1750 (full carga)</b>	
<b>FLUJO DE MASA (LB/H)</b>		<b>237</b>		<b>117</b>		<b>N° POLOS: 4</b>	
<b>MECANICO</b>							
<b>N° CILINDROS: 2</b>		<b>DESPL: 2.538 in<sup>3</sup>/rev</b>		<b>DESPL: 307.4160 ft<sup>3</sup>/h</b>			
<b>MEDIDA DE CALIBRE: 1.516 in</b>		<b>RECORRIDO: 0.703 in</b>		<b>PESO NETO: 60 lbs</b>			
<b>LARGO TOTAL: 10.228 in</b>		<b>ANCHO TOTAL: 9.655 in</b>		<b>ALTURA TOTAL: 13.31 in</b>			
<b>LARGO: 7.5 in</b>		<b>ANCHO: 7.5 in</b>		<b>ALTURA: 13.69 in</b>			
<b>MEDIDA DE SUCCIÓN: 3/4"</b>		<b>MEDIDA DE DESCARGA: 3/8"</b>		<b>CARGA INICIAL DE ACEITE: 45 oz</b>			
<b>DIAMETRO DE SUCCIÓN: 5/8"</b>		<b>DIAMETRO DE DESCARGA: 1/2"</b>		<b>RECARGA DE ACEITE: 43 oz</b>			
<b>PLACA</b>							
<b>OIL</b>	<b>MO</b>	<b>PRO</b>	<b>VOLTIOS</b>	<b>HZ</b>	<b>LRA</b>		
<b>45 POE</b>	<b>E</b>	<b>T</b>	<b>200-230</b> <b>200 220</b>	<b>60</b> <b>50</b>	<b>51</b> <b>51</b>		



### 3. Ficha técnica del condensador.

		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		<b>CODIGO:04</b>	<b>FICHA: 3/12</b>		
		<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>		<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>			
				<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M			
<b>FICHA TECNICA DEL CONDENSADOR</b>							
<b>CARACTERISTICAS</b>				<b>CONDENSADOR</b>			
<b>MARCA: ACEC</b>		<b>MODELO: -----</b>		 			
<b>SERIE: -----</b>		<b>TIPO: ALETEADO</b>					
<b>VOLTAJE: 200/230 VOLTIOS</b>		<b>CAPACIDAD: 6000 BTU/H</b>					
<b>TEMPERATURA: 26 °C</b>		<b>REFRIGERANTE: R-134a</b>					
<b>DIAMETRO DE SUCCIÓN: 5/8"</b>		<b>DIAMETRO DE DESCARGA: 1/2"</b>					
<b>NÚMERO DE ALETAS: 132</b>		<b>NÚMERO DE TUBOS: 54</b>					
<b>ÁREA DE TRANSFERENCIA</b>							
<b>INTERNA: 1282 in<sup>2</sup></b>		<b>EXTERNA: 14460 in<sup>2</sup></b>					
<b>DISTRIBUCIÓN DE TUBOS: TRIANGULAR 30°</b>		<b>FRECUENCIA: 60 HZ</b>					
<b>MOTOR ELECTRICO</b>							
<b>Nº</b>	<b>HP</b>	<b>RPM</b>	<b>V</b>	<b>A</b>	<b>MARCA</b>	<b>MODELO</b>	<b>SERIE</b>
1	1/2	1750	200-230	1.2	-----	-----	-----




#### 4. Ficha técnica de las válvulas de expansión termostáticas.

	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	<b>CODIGO:05</b>	<b>FICHA: 4/12</b>
	<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>	<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>	
		<b>ELABORADO: LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M</b>	
<b>FICHA TECNICA DE LAS VET</b>			
<b>CARACTERISTICAS</b>		<b>VALVULAS DE EXPANSIÓN TERMOSTATICA 1 Y 2</b>	
<b>NOMENCLATURA: AFAE1/2MC5FT3/8x1/2SAEANG</b>			
<b>REFRIGERANTE: R-134a</b>	<b>CAPACIDAD: ½ TON</b>		
<b>DIAMETRO DE IN: 3/8"</b>	<b>DIAMETRO DE OUT: 1/2"</b>		
<b>LONGITUD TUBO CAPILAR: 5ft</b>	<b>CODIGO DE CARGA: Media temperatura</b>		
<b>DIMENSIONES</b>			
<b>A: 1-41/64 (1.64) in</b>	<b>B: 1-5/16 (1.31) in</b>	<b>C: 1-23/64 (1.36) in</b>	
			



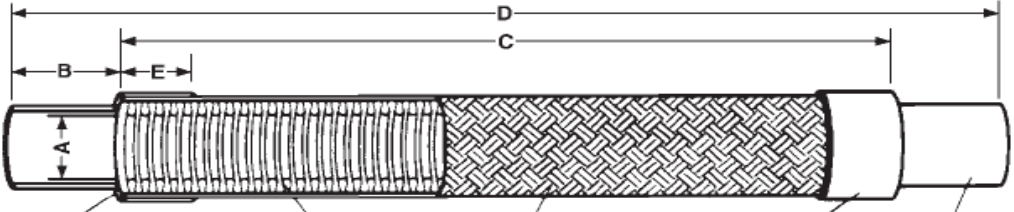

## 5. Ficha técnica del evaporador.

	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		<b>CODIGO:02</b>	<b>FICHA: 5/12</b>			
	<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>		<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>				
		<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M					
<b>FICHA TECNICA DEL EVAPORADOR</b>							
<b>CARACTERISTICAS</b>		<b>EVAPORADOR</b>					
<b>MARCA:</b> EQUIPRAC SA.							
<b>MODELO:</b> E20LE-300							
<b>SERIE:</b> A940056							
<b>TIPO:</b> ALETEADO							
<b>REFRIGERACIÓN:</b> AIRE		<b>VOLTAJE:</b> 200/230 VOLTIOS	<b>CAPACIDAD:</b> 6000 BTU/H				
<b>DIAMETRO DE SUCCIÓN:</b> 5/8"		<b>NÚMERO DE ALETAS:</b> 124	<b>REFRIGERANTE:</b> R-134a				
<b>DIAMETRO DE DESCARGA:</b> 1/2"		<b>NÚMERO DE TUBOS:</b> 60	<b>TEMPERATURA:</b> 20 F				
<b>ÁREA DE TRANSFERENCIA</b>		<b>INTERNA:</b> 1130 in <sup>2</sup>	<b>DISTRIBUCIÓN DE TUBOS:</b> TRIANGULAR 30°				
		<b>EXTERNA:</b> 40578 in <sup>2</sup>	<b>FRECUENCIA:</b> 60 HZ				
<b>MOTOR ELECTRICO</b>							
<b>Nº</b>	<b>HP</b>	<b>RPM</b>	<b>V</b>	<b>A</b>	<b>MARCA</b>	<b>MODELO</b>	<b>SERIE</b>
1	1/20	1550	208-240	10.5	MAGNETEK	JA2R210K	37E-77446R




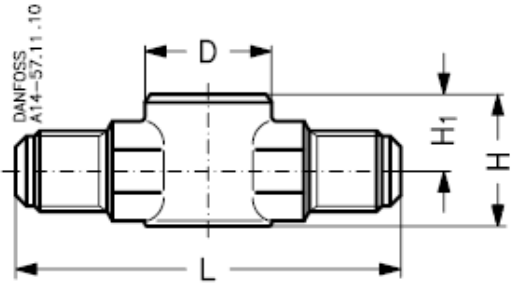
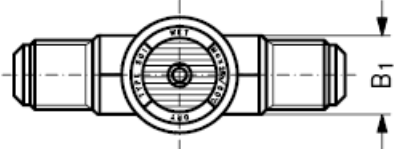
## 6. Ficha técnica del intercambiador de calor y el recipiente de succión.

		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		<b>CODIGO:06</b>	<b>FICHA: 6/12</b>
		<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>		<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>	
<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M					
<b>FICHA TECNICA DE LOS ACCESORIOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN</b>					
<b>CARACTERISTICAS</b>				<b>INTERCAMBIADOR DE CALOR</b>	
<b>TUBO</b>	<b>DIAMETRO IN:</b> 1 4/8 "	<b>DIAMETRO OUT:</b> 1 4/8 "			
<b>CASCO</b>	<b>DIAMETRO IN:</b> 7/8"	<b>DIAMETRO OUT:</b> 7/8"			
<b>LONGITUD:</b>					
<b>FUNCIÓN</b>	El objeto de un he es conseguir máxima transferencia de calor con mínima pérdida de carga.				
<b>VENTAJAS</b>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Recalentamiento del gas aspirado.</li> <li>✓ Evita el golpe de líquido en el compresor.</li> <li>✓ El subenfriamiento contrarresta la formación de vapor que reduciría la capacidad de la VET.</li> <li>✓ Mejora los costos de operación.</li> </ul>					
<b>CARACTERÍSTICAS</b>				<b>RECIPIENTE DE SUCCIÓN</b>	
<b>DIAMETRO DE IN:</b> 5/8"		<b>DIAMETRO DE OUT:</b> 5/8"			
<b>FUNCIÓN</b>					
Garantizar la succión de solo vapor de refrigerante y asegurar la estanquidad de los lodos dentro del recipiente.					

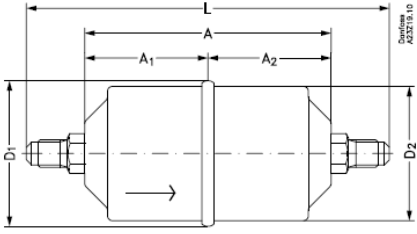
7. Ficha técnica del amortiguador de vibraciones y separador de aceite.

	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	<b>CODIGO:06</b>	<b>FICHA:</b> 7/12
	<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>	<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>	<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M
<b>FICHA TECNICA DE LOS ACCESORIOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN</b>			
<b>CARACTERISTICAS</b>		<b>AMORTIGUADOR DE VIBRACIONES</b>	
<b>A:</b> 2cm			
<b>B:</b> 3cm			
<b>C:</b> 20 cm			
<b>D:</b> 26 cm	<b>E:</b> 1.2 cm	<b>POSICIÓN:</b> Horizontal	
			
<b>FUNCIÓN</b>	Se instala en la línea de succión del compresor para evitar que las vibraciones afecten el compresor.		
<b>CARACTERISTICAS</b>		<b>SEPARADOR DE ACEITE</b>	
<b>REFRIGERANTE:</b> R-134a	<b>DIAMETRO DE RETORNO:</b> 1/4''		
<b>DIAMETRO DE IN:</b> 1/2''	<b>DIAMETRO DE OUT:</b> 1/2''		
<b>FUNCIÓN</b>			
Evitar que circule aceite por las líneas			

8. Ficha técnica del recipiente y visor de líquido.

		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		<b>CODIGO:06</b>	<b>FICHA:</b> 8/12
		<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>		<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>	
<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M					
<b>FICHA TECNICA DE LOS ACCESORIOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN</b>					
<b>CARACTERISTICAS</b>			<b>RECIPIENTE DE LIQUIDO</b>		
<b>DIAMETRO DE IN:</b> 1/2''		<b>DIAMETRO DE OUT:</b> 1/2''			
<b>FUNCIÓN</b>					
Asegurar la alimentación de líquido al evaporador y retener el vapor.					
<b>CARACTERISTICAS</b>			<b>VISOR</b>		
<b>REFERENCIA:</b> SGN 16		<b>CODIGO:</b> 014-0165			
<b>RANGO DE TEMPERATURA:</b> 50°C a 80 °C		<b>PB</b> 35 bar /80 °C			
<b>MWP</b> 500 Psi /175 F		<b>CONEXIÓN:</b> 16X16			
<b>DIMENSIONES</b>					
<b>L:</b> 104 mm		<b>D:</b> 37 mm	<b>H:</b> 37 mm	<b>H<sub>1</sub>:</b> 21 mm	<b>B<sub>1</sub>:</b> 27 mm
					
<b>FUNCIÓN</b>		Permite ver desde el exterior el nivel de líquido del refrigerante.			

## 9. Ficha técnica del filtro secador.

	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		<b>CODIGO:06</b>	<b>FICHA:</b> 9/12	
	<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>		<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>		
			<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M		
<b>FICHA TECNICA DE LOS ACCESORIOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN</b>					
<b>CARACTERISTICAS</b>			<b>FILTRO SECADOR</b>		
<b>MARCA: DANDOSS</b>		<b>SERIE: 023Z5043</b>			
<b>NOMENCLATURA: DML 163</b>					
<b>DATOS TECNICOS</b>					
<b>NUCLEO SOLIDO SUPERFICIE: 220 cm<sup>2</sup></b>		<b>NUCLEO SOLIDO VOLUMEN: 234 cm<sup>2</sup></b>		<b>CONEXIÓN: 3/8 in (10 mm)</b>	
<b>VOLUMEN ENVOLTURA: 0.36 L</b>		<b>VOLUMEN NETO: 0.122 L</b>		<b>PESO: 0.82 Kg.</b>	
<b>CAPACIDAD DE ACIDO: 2.9 gr.</b>		<b>RANGO DE TEMPERATURA: -40 a 70 °C (-40 a 170 °F)</b>		<b>VOLUMEN: 16 in<sup>3</sup></b>	
<b>CAPACIDAD DE SECADO EN Kg. DE REFRIERANTE</b>	<b>24 °C</b>		<b>52 °C</b>		<b>CAPACIDAD DE LIQUIDO: 22 Kw</b>
	27		25.5		<b>PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO: 42 bar</b>
<b>DIMENSIONES</b>	<b>A: 110 mm</b>		<b>A<sub>1</sub>: 55 mm</b>		<b>A<sub>2</sub>: 55 mm</b>
	<b>L: 167 mm</b>		<b>D<sub>1</sub>: 80 mm</b>		<b>D<sub>2</sub>: 76 mm</b>
					
<b>FUNCIÓN</b>	Consiste de un material que retiene eficazmente la humedad, los ácidos dañinos, las partículas extrañas, los sedimentos, así como los productos de descomposición del aceite.				



## 10. Ficha técnica del presostato.

		<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		<b>CODIGO:06</b>		<b>FICHA:</b> 10/12	
				<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>		<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M	
<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>		<b>FICHA TECNICA DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN</b>					
<b>CARACTERISTICAS</b>				<b>PRESOSTATO</b>			
<b>MARCA:</b> DANDOSS		<b>TIPO:</b> KP15					
<b>PESO:</b> 0.806 Kg.		<b>RANGO DE TEMPERATURA:</b> -40 a 65 °C (-40 a 149 °F)					
<b>LONGITUD DEL TUBO CAPILAR:</b> 36 in (900 mm)		<b>CONEXIÓN:</b> ¼ in					
<b>DIFERENCIAL LADO IZQUIERDO:</b> 0.70 a 4 bar (10 a 58 psi)		<b>DIFERENCIAL LADO DERECHO:</b> 4 bar (58 psi)					
<b>MAXIMA PRESIÓN DE TRABAJO LADO IZQUIERDO:</b> 17 bar (245 psig)		<b>MAXIMA PRESIÓN DE TRABAJO LADO DERECHO:</b> 35 bar (510 psig)					
<b>CONTROLADOR</b>							
<b>CONTACTOS</b>	<b>VOLTAGE</b>		<b>FLA</b>	<b>LR48A</b>	<b>CARGA</b>	<b>PILOT DUTY</b>	
	<b>AC</b>	<b>DC</b>					
A-B A-C	240		8	48	8 A	3A	
	120		16	96	16 A		
	-----	240	-----	-----	-----	-----	12W
A-D	240	-----	-----	-----	-----		50 VA
<b>FUNCIÓN</b>		Este detiene el compresor en caso de una disminución de la presión de aspiración o de un aumento de la presión de descarga y se pone en marcha cuando las condiciones se restablecen.					

### 11. Ficha técnica de la fuente reguladora y del autotransformador variable.

	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	<b>CODIGO:06</b>	<b>FICHA: 11/12</b>
	<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>	<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>	
<b>ELABORADO: LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M</b>			
<b>FICHA TECNICA DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN</b>			
<b>CARACTERISTICAS</b>		<b>FUENTE REGULADORA</b>	
<b>MARCA:</b> DELTA	<b>TIPO:</b> DVPPS02		
<b>ENTRADA DE POTENCIA:</b> 100-240 VAC	<b>SALIDA DE POTENCIA:</b> 24 VDC		
<b>CORRIENTE:</b> 1 Amp	<b>FRECUENCIA:</b> 50/60 Hz		
<b>HUMEDAD:</b> 50 a 95 %	<b>TEMPERATURA:</b> 0 a 55 °C		
<b>PESO:</b> 210 g.	<b>EFICIENCIA:</b> 78 a 87 % full carga		
<b>DIMENSIONES</b>			
<b>ALTO:</b> 90 mm	<b>ANCHO:</b> 60 mm	<b>LARGO:</b> 55 mm	
<b>FUNCIÓN</b>	Mantener constante el voltaje de alimentación de los Field Point (24 VDC).		
<b>CARACTERISTICAS</b>		<b>AUTOTRANSFORMADOR VARIABLE</b>	
<b>MARCA:</b> Powerstat	<b>SERIE:</b> 126		
<b>VOLTAJE DE ENTRADA:</b> 120 V	<b>VOLTAJE DE SALIDA:</b> 0-140 V		
<b>FRECUENCIA:</b> 50/60 Hz	<b>CORRIENTE:</b> 15 Amps		
<b>PH:</b> 1	<b>KVA:</b> 2.1		
<b>TEMPERATURA:</b> -20 a 50°C	<b>HUMEDAD:</b> 95%		
<b>FUNCIÓN</b>	Variar la potencia de salida.		

## 12. Ficha técnica del variador de velocidad.

	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		<b>CODIGO:0</b> 6	<b>FICHA:</b> 12/12			
	<b>REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO</b>		<b>FECHA: SEPTIEMBRE/08</b>				
<b>ELABORADO:</b> LILIANA GÓMEZ S DANIEL BARAJAS M							
<b>FICHA TECNICA DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN</b>							
<b>CARACTERISTICAS</b>			<b>VARIADOR DE VELOCIDAD</b>				
<b>MARCA: ABB</b>		<b>SERIE: ACS350-03E-17A6-2</b>					
<b>PESO: 1.9 Kg.</b>		<b>RANGO DE TEMPERATURA: -10 a 50°C (14 a 122 °F)</b>					
<b>HUMEDAD: 0 a 95%</b>		<b>DECIBELES: 50 a 62</b>					
<b>ESPECIFICACIONES DE INTENSIDAD Y POTENCIA</b>							
<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA</b>			<b>BASTIDOR</b>			
$I_{1N} = 20.8A$	$I_{2N} = 17.6A$	$I_{2,1} = 26.4A$	$I_{2m\acute{a}x} = 30.8A$	$P_N$ 4 Kw   5 CV B2			
$I_{1N}$ y $I_{2N}$ : Intensidad eficaz continúa. $I_{2,1}$ : Intensidad máxima (sobrecarga del 50%) durante 1 minuto cada 10 minutos. $I_{2m\acute{a}x}$ : Intensidad de salida máxima. $P_N$ : Potencia típica del motor.							
<b>REQUISITOS DEL FLUJO DE AIRE DE REFRIGERACIÓN</b>							
<b>PÉRDIDA DE CALOR</b>	<b>CIRCUITO PRINCIPAL</b>	$I_{1N}$ y $I_{2N}$ nominales	W	152	<b>FLUJO DE AIRE</b>	$m^3/h$	52
			Btu/h	519			
	<b>CIRCUITO DE CONTROL</b>	<b>Mín.</b>	W	10.5		$ft^3/h$	31
			Btu/h	36			
		<b>Máx.</b>	W	27.5			
			Btu/h	94			
<b>DIMENSIONES</b>							
<b>ALTO: 282 mm</b>			<b>ANCHO: 169 mm</b>		<b>LARGO: 105 mm</b>		
<b>FUNCIÓN</b>		Cambiar las RPM del compresor variando la frecuencia de alimentación del mismo.					

**ANEXO B: TABLAS DEL COMPRESOR COPELAN CS12K6E-TF5**

## 1. Datos técnicos del compresor Copeland CS12K6E-TF5.

### CS12K6E-TF5



HFC, R-134a, Mid Point, 60 Hz, 3 - Fase, 200/230 V  
High Temperature

Estado de Producción: Disponible para venta a clientes en los EEUU. Por favor solicite información a su representante local de Emerson Climate Technologies sobre la disponibilidad internacional.

Rendimiento		Mecánico	
Evap(°F)/Cond (°F)	45/130	20/120	
RG(°F)/Liq(°F)	65/130	65/120	
Capacidad (Btu/hr):	13600	7300	
Potencia (Watts):	1430	989	
Corriente (Amps):	4.4	3.8	
EER (Btu/Wh):	9.5	7.4	
Flujo de Masa (lbs/hr):	237.0	117.0	
Potencia del Sonido(dBA):	0 Ave	0 Max	
Vibración (mils(peak-peak)):	0.0 Ave	0.0 Max	
Fecha de Archivo:	2002-08-09		
Número de Cilindros:	2	Despl (in <sup>3</sup> /Rev):	2.338
Medida de Calibre (in):	1.516	Despl (ft <sup>3</sup> /hr):	308.4160
Recorrida (in):	0.703		
Lago Total (in):	10.228	Largo (in):	7.5
Ancho Total (in):	9.655	Ancho(in):	7.5
Altura Total (in):	13.31	Altura (in):	13.69*
Medida de Succión (in):	3/4 Stub		
Medida de Descarga (in):	3/8 Stub		
Carga Inicial de Aceite (oz):	45		
Recarga de Aceite (oz):	43		
Peso Neto (lbs):	60.0		
Volumen Libre Interno (in <sup>3</sup> ):			
HorsePower			
* Altura total del compresor sobre patas de montaje Copeland originales.			

### Eléctrico

LRA-Alto*:	51.0	MCC (Amps):	10.5	UL File No.:	SA-2337
LRA-Medio Bobinado:		RPM:		UL File Date:	28-Dec-1984
LRA-Bajo*:		Corriente Operativa Máx.:		Archivo CSA No.:	LR3104C
RLA(=MCC/1.4; use for contactor selection):	7.5				
RLA (MCC/1.56; use for breaker & wire size selection):	6.7				
*Baja y Alta, se refieren respectivamente, a los límites inferior y superior del rango de voltaje de trabajo para el cual el motor está					

### Aplicaciones Alternativas

Refrigerante	Frecuencia(Hz)	Fase	Voltaje	Aplicación
R-134a HFC	50	3	200/220	High Temperature
R-22 HCFC	50	3	200/220	Medium Temperature
R-404A HFC	50	3	200/220	
R-404A HFC	50	3	200/220	Extended Medium Temp
R-507 HFC	50	3	200/220	
R-507 HFC	50	3	200/220	Extended Medium Temp
R-22 HCFC	60	3	200/230	Medium Temperature
R-404A HFC	60	3	200/230	
R-404A HFC	60	3	200/230	Extended Medium Temp
R-507 HFC	60	3	200/230	
R-507 HFC	60	3	200/230	Extended Medium Temp

## 2. Rendimiento del compresor Copeland CS12K6E-TF5

Condiciones operativas  
 65 °F Return Gas  
 0 °F Subcooling  
 95 °F Ambient Air Over

60 Operación en Hz

**HIGH  
 TEMPERATURE**

HFCs Require Use of Polyol Ester  
 Lubricant Approved on Form 93-11

**CS12K6E-TF5**  
 COPELAWELD® HFC-134A  
 COMPRESSOR  
 TF5 200/230-3-60

Condensing Temperature °F  
 (Sat Dew Pt Pressure, psig)

Evaporating Temperature °F (Sat Dew Pt Pressure, psig)

		140 (229)	-10 (1.9)	0 (6.5)	5 (9.1)	10 (12)	15 (15)	20 (20)	25 (25)	30 (30)	35 (35)	40 (40)	45 (45)	50 (50)	55 (51)
130 (199)	C							4330	5350	6510	7790	9180	10700	12200	15500
	P							875	977	1080	1180	1290	1390	1490	1840
	A							3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.4	4.5	4.8
	M							78	97	119	143	169	198	228	293
	E							5	5.5	6	6.6	7.1	7.7	8.2	9.4
%								56.7	59.1	61	62.3	63.1	63.5	63.5	62.4
120 (171)	C			4230	5080	6110	7300	8630	10100	11700	13300	15100	18700		
	P			755	828	908	989	1070	1150	1230	1310	1370	1470		
	A			3.6	3.7	3.8	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3	4.4		
	M			67	81	97	117	138	163	189	217	247	310		
	E			5.6	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.5	10.2	11	12.8		
%			55.6	57.3	59	60.3	61.3	61.8	61.8	61.8	61.5	60.9	58.8		
110 (146)	C		4220	4960	5910	7030	8320	9750	11300	13000	14800	16800	20500		
	P		708	767	833	903	977	1050	1120	1190	1250	1300	1380		
	A		3.6	3.6	3.7	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.2	4.4		
	M		63	74	89	106	126	148	172	198	228	256	320		
	E		6	6.5	7.1	7.8	8.5	9.3	10.1	10.9	11.8	12.7	14.8		
%		55.6	56.7	58	59.2	60.2	60.6	60.7	60.4	60.4	59.7	58.7	55.8		
100 (124)	C	3820	4850	5690	6740	7970	9360	10900	12600	14400	16200	18200	22300		
	P	635	713	766	826	899	955	1020	1080	1140	1190	1230	1280		
	A	3.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.8	3.9	3.9	4	4.1	4.1	4.2		
	M	54	69	81	98	114	134	156	181	208	236	266	326		
	E	6	6.8	7.4	8.2	9	9.8	10.7	11.6	12.6	13.6	14.8	17.4		
%	56.6	56	56.9	58	58.8	59.3	59.3	59	58.2	57	55.5	51.8			
90 (104)	C	4210	5450	6410	7560	8900	10400	12100	13800	15700	17700	19800	24200		
	P	634	705	754	808	866	925	983	1040	1090	1130	1160	1180		
	A	3.5	3.6	3.6	3.6	3.7	3.8	3.8	3.9	3.9	4	4	4.1		
	M	57	74	87	103	121	142	165	190	217	245	275	336		
	E	6.6	7.7	8.5	9.4	10.3	11.3	12.3	13.3	14.5	15.7	17.1	20.4		
%	55.6	55.6	56.5	57.2	57.6	57.6	57.2	56.3	54.9	53.1	50.9	45.8			
80 (87)	C	4560	6030	7100	8370	9820	11400	13200	15100	17200	19300	21500	26100		
	P	619	686	731	781	834	887	939	986	1030	1060	1080	1090		
	A	3.5	3.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.8	3.8	3.9	3.9	3.9	3.9		
	M	59	78	92	108	127	149	172	198	225	254	284	346		
	E	7.4	8.8	9.7	10.7	11.8	12.9	14.1	15.3	16.7	18.2	19.9	24		
%	53.9	54.4	55.1	55.5	55.5	55	53.9	52.3	50.3	47.7	44.7	37.1			
70 (71)	C	4860	6560	7760	9150	10700	12500	14400	16400	18600	20800	23200	28000		
	P	592	658	698	745	794	843	889	931	965	991	1000	986		
	A	3.5	3.5	3.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8		
	M	60	81	96	113	133	155	179	205	233	263	293	356		
	E	8.2	10	11.1	12.3	13.5	14.8	16.2	17.6	19.2	21	23.1	28.3		
%	51.4	52.4	52.9	52.9	52.3	51.1	49.3	46.9	43.9	40.3	36.1	25.8			

C:Capacity(Btu/hr), P:Power(Watts), A:Current(Amps), M:Mass Flow(lbs/hr), E:EER(Btu/Watt-hr), %:Isentropic Efficiency(%)

### 3. Capacidades del compresor CS12K6E-TF5.



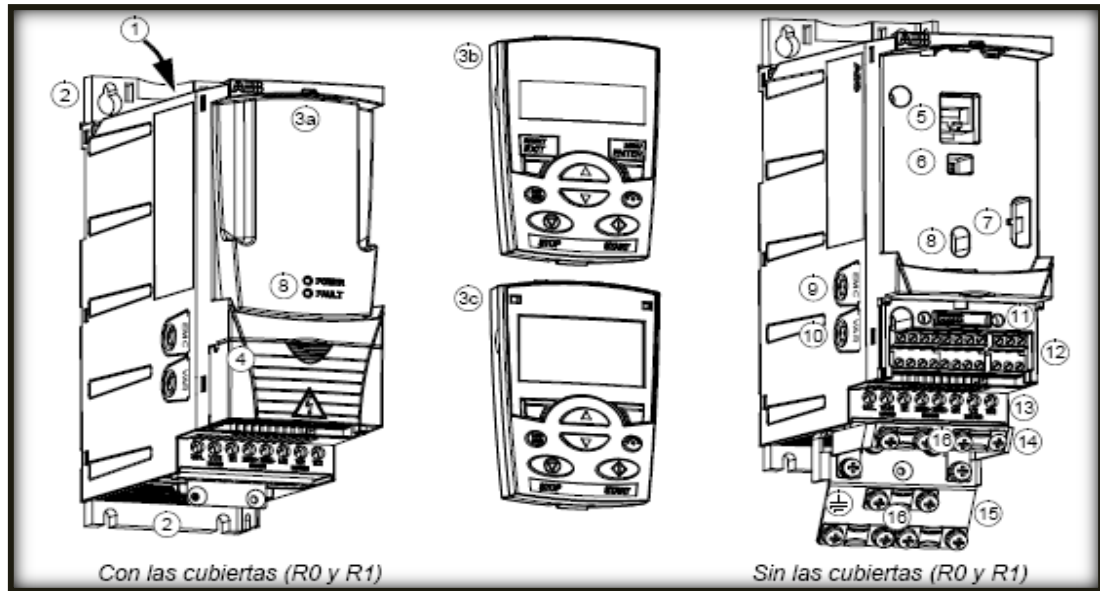
Datos de Rendimiento de Herméticos CS/CF Para Refrigeración - R-404A & R-134a - 60 Hz - KCAL

Modelos R-134a	HP	°C Cond.	10°C	5°C	0°C	-5°C	-10°C	-15°C	-20°C	-25°C
			50°F	41°F	32°F	23°F	14°F	5°F	-4°F	-13°F
<b>HERMÉTICOS DE REFRIGERACION R-134a</b>										
CS10K8E	1.3	35	4,430	3,880	3,420	3,270	1,710	1,270	990	
		45	3,780	3,100	2,400	1,850	1,370	1,000		
		55	3,100	2,540	1,970	1,450	1,030			
CS12K8E	1.8	35	5,330	4,390	3,530	3,210	2,080	1,530	1,100	
		45	4,560	3,700	2,900	2,230	1,640	1,200		
		55	3,830	3,050	2,370	1,750	1,240			
CS14K8E	2	35	6,240	5,160	4,130	3,230	2,430	1,790	1,300	
		45	5,330	4,340	3,440	2,820	1,940	1,410		
		55	4,520	3,610	2,800	2,060	1,480			
CS18K8E	2.6	35	7,960	6,580	5,250	4,090	3,100	2,280	1,730	
		45	6,790	5,550	4,380	3,350	2,480	1,790		
		55	5,720	4,600	3,530	2,820	1,880			
CS20K8E	3	35	8,860	7,310	5,850	4,560	3,440	2,540	1,820	
		45	7,610	6,190	4,900	3,740	2,750	2,000		
		55	6,410	5,120	3,900	2,920	2,070			
CS27K8E	3.5	35	12,170	9,800	7,850	5,850	4,300	3,140	2,320	
		45	10,360	8,170	6,200	4,640	3,400	2,490		
		55	8,510	6,580	4,950	3,600	2,710			
CS33K8E	4	35	13,590	11,210	9,000	6,970	5,180	3,740	2,840	
		45	11,780	9,590	7,530	5,830	4,130	3,010		
		55	9,930	7,910	6,000	4,470	3,230			



**ANEXO C: PARTES, DESCRIPCIÓN, CONEXIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL  
VARIADOR DE VELOCIDAD**

## 1. Partes del variador de velocidad.



1	Salida de refrigeración por la cubierta superior	9	Tornillo de conexión a tierra del filtro EMC
2	Orificios de montaje	10	Tornillo de conexión a tierra del varistor (VAR)
3	Cubierta del panel (a)/ panel de control (b)/ panel de control asistente (c)	11	Conexión del adaptador de bus de campo (módulo de comunicación serie)
4	Cubierta de terminales (o unidad de potenciómetro opcional MPOT-01)	12	Conexiones de E/S
5	Conexión del panel	13	Conexión de alimentación de entrada (U1,V1,W1), conexión de la resistencia de frenado (BRK+,BRK-) y conexión del motor (U2,V2,W2)
6	Conexión de dispositivos opcionales	14	Placa de fijación E/S
7	Conexión FlashDrop	15	Placa de fijación
8	LED de Power (en marcha) y Fault (fallo)	16	Abrazaderas

## 2. Explicación del código y de la placa.

### CÓDIGO

El código de tipo contiene información acerca de las especificaciones y la configuración del convertidor. Puede verse en la etiqueta de designación de tipo fijada en el convertidor de frecuencia.

CODIGO	EXPLICACIÓN
<p><b>ACS350-03E-17A6-2</b></p>	SERIE DE PRODUCTO
	03: ENTRADA TRIFASICA
	E: FILTRO EMC CONECTADO, FRECUENCIA 50 HZ
	17A6: 17.6 AMPERIOS
	2: 200 A 240 V CA. TENSIÓN DE ENTRADA

### PLACA

<b>ABB</b>		ACS350-03E-17A6-2 <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">1</span>
<span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">2</span>	IP20 / UL Open type 4 kW (5 HP)	S/N 62900888WS <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">4</span>
<span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">3</span>	U1 3-200...240V	<span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">5</span>
I1	20.8 A	
F1	48...63 Hz	
U2	3-0...U1V	
I2	17.6 A (150% 1/10 min)	
f2	0...500 Hz	<span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">6</span>

ITEM	EXPLICACIÓN
1	Código de tipo
2	Grado de protección
3	Especificaciones Nominales
4	Número de serie
5	Código MRP ABB del convertidor
6	Marca

### 3. Descripción del panel de control

La tabla siguiente resume las funciones de las teclas y las pantallas del panel de control básico.

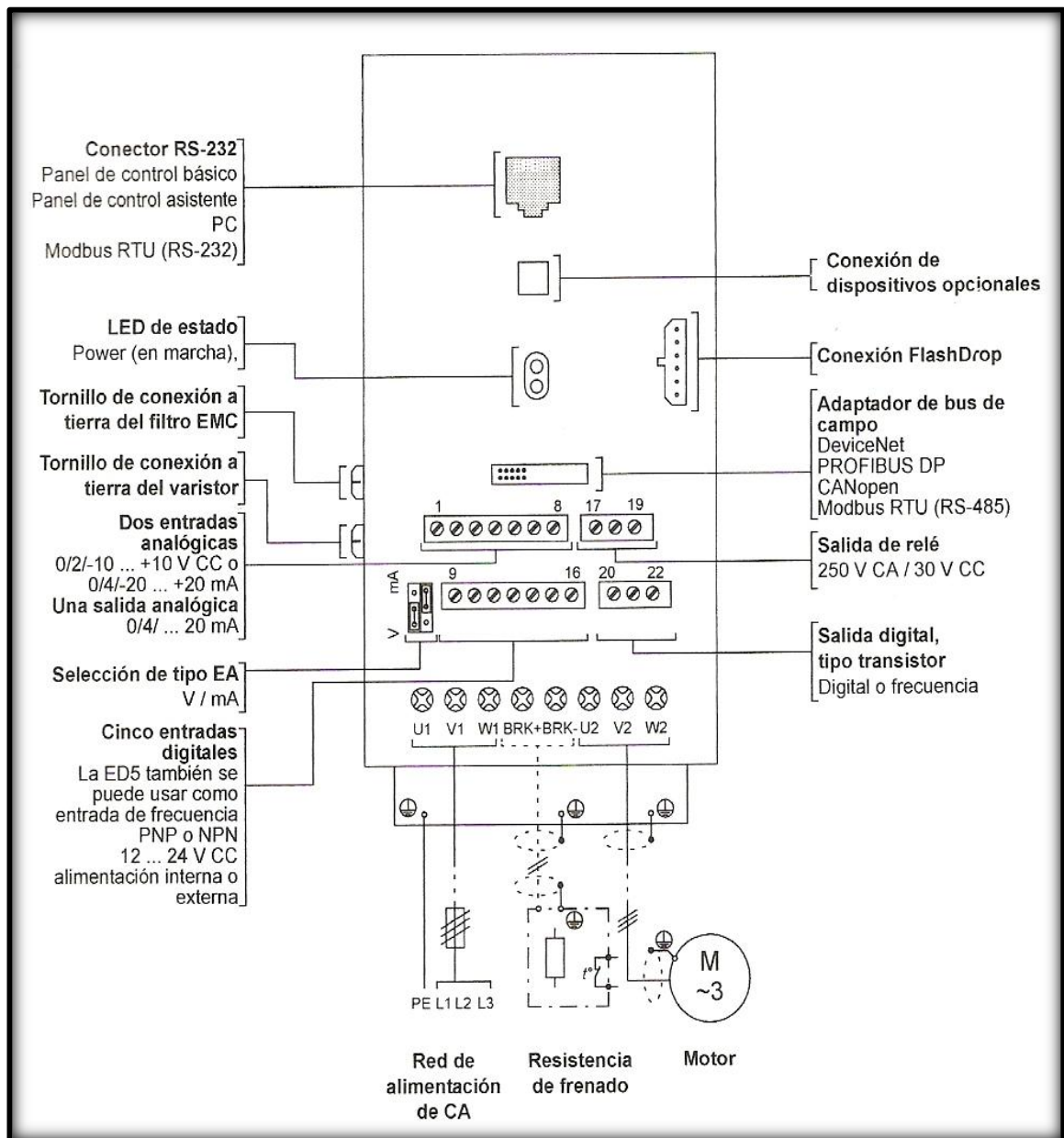


N.º	Uso
1	<p>Pantalla LCD – Se divide en cinco áreas:</p> <p>a. Superior izquierda – Lugar de control:            LOC: el control del convertidor es local, es decir, desde el panel de control.            REM: el control del convertidor es remoto, como el bus de campo o la E/S del convertidor.</p> <p>b. Superior derecha – Unidad del valor visualizado.</p> <p>c. Central – Variable, en general muestra valores de parámetros y señales, menús o listas. También muestra códigos de alarma y fallos.</p> <p>d. Inferior izquierda y central – Estado de funcionamiento del panel:            OUTPUT: Modo de Salida            PAR: Modo de Parámetros            MENU: Menú principal.  <b>FAULT</b>: Modo de fallo.</p> <p>e. Inferior derecha – Indicadores:            FWD (avance) / REV (inversa): dirección de giro del motor.            Parpadeo lento: parado            Parpadeo rápido: en marcha, no en el punto de consigna            Iluminación constante: en marcha, en el punto de consigna  <b>SET</b>: El valor visualizado se puede modificar (en los Modos de Parámetros y de Referencia).</p>
2	REARME/SALIR – Sale al siguiente nivel del menú superior sin guardar los valores cambiados. Restaura los fallos en los Modos de Salida y de Fallo.
3	MENU/INTRO – Permite profundizar en el nivel del menú. En el Modo de Parámetros, guarda el valor visualizado como el nuevo ajuste.
4	<p>Arriba –</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite desplazarse hacia arriba por un menú o lista.</li> <li>• Incrementa un valor si se ha seleccionado un parámetro.</li> <li>• Incrementa el valor de referencia en el Modo de Referencia.</li> </ul> <p>Si la tecla se mantiene pulsada, el valor cambia más rápidamente.</p>
5	<p>Abajo –</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite desplazarse hacia abajo por un menú o lista.</li> <li>• Reduce un valor si se ha seleccionado un parámetro.</li> <li>• Disminuye el valor de referencia en el Modo de Referencia.</li> </ul> <p>Si la tecla se mantiene pulsada, el valor cambia más rápidamente.</p>
6	LOC/REM – Cambia entre control local y remoto del convertidor.
7	DIR – Cambia la dirección de giro del motor.
8	STOP – Detiene el convertidor en control local.
9	START – Arranca el convertidor en control local.

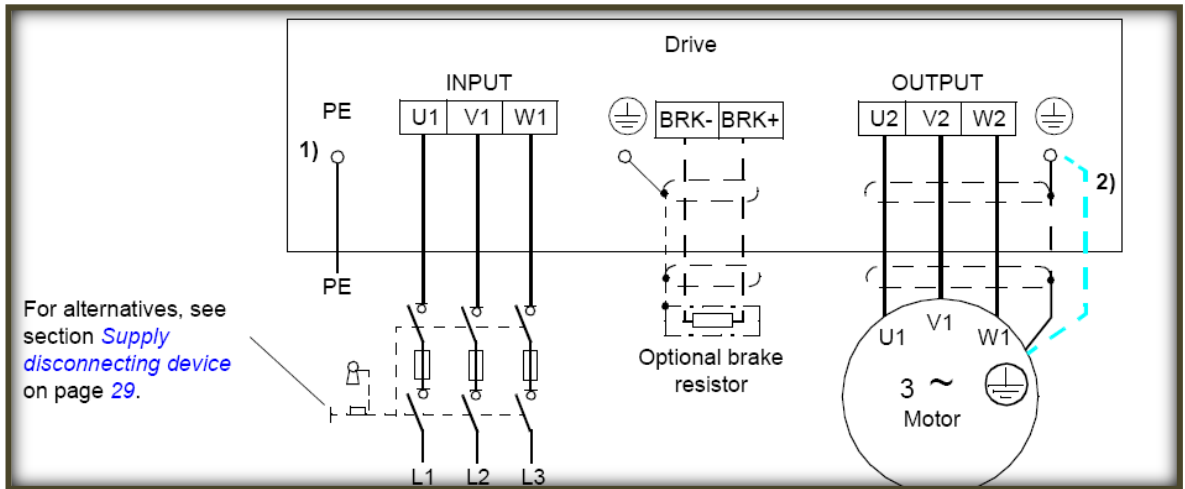
#### 4. Conexiones, interruptores y led

Para las conexiones del variador de velocidad ACS350 se escogió el macro estándar que trae el ABB pues este macro sirve para las condiciones de control del cuarto frío.

#### DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CONEXIONES

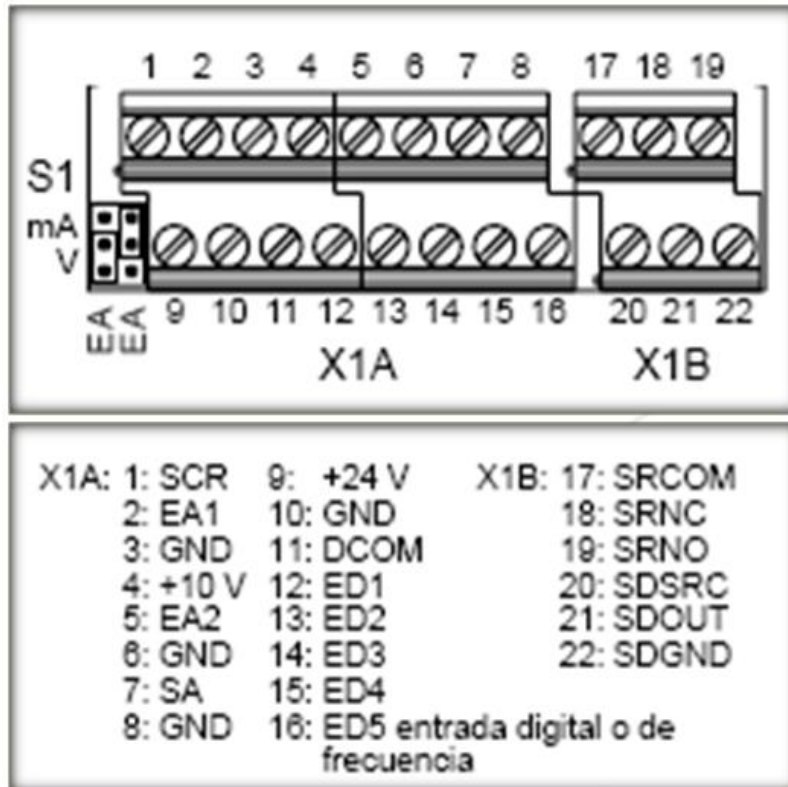


## CONEXIÓN DE LOS CABLES DE POTENCIA

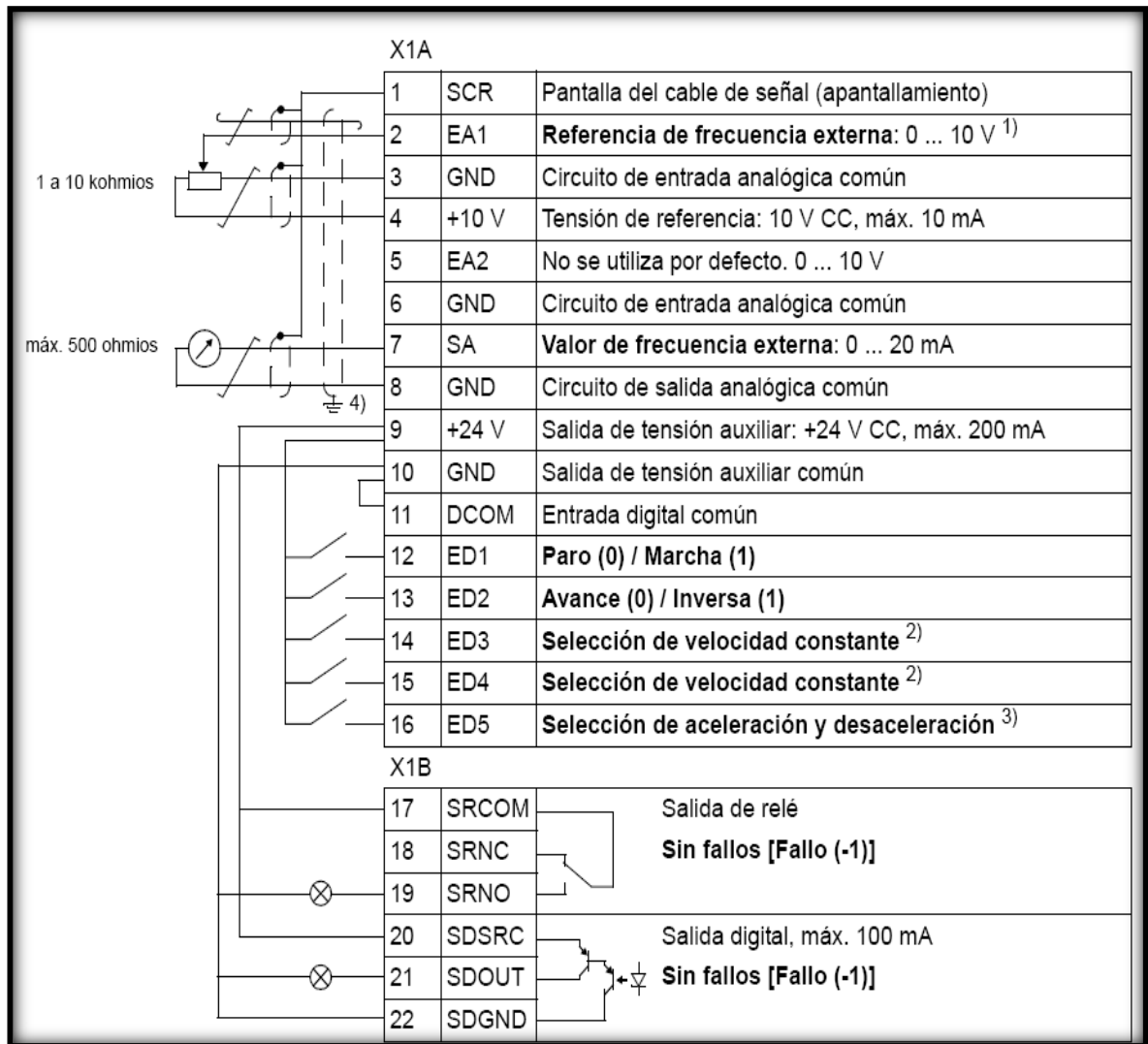


## CONEXIÓN DE LOS CABLES DE CONTROL

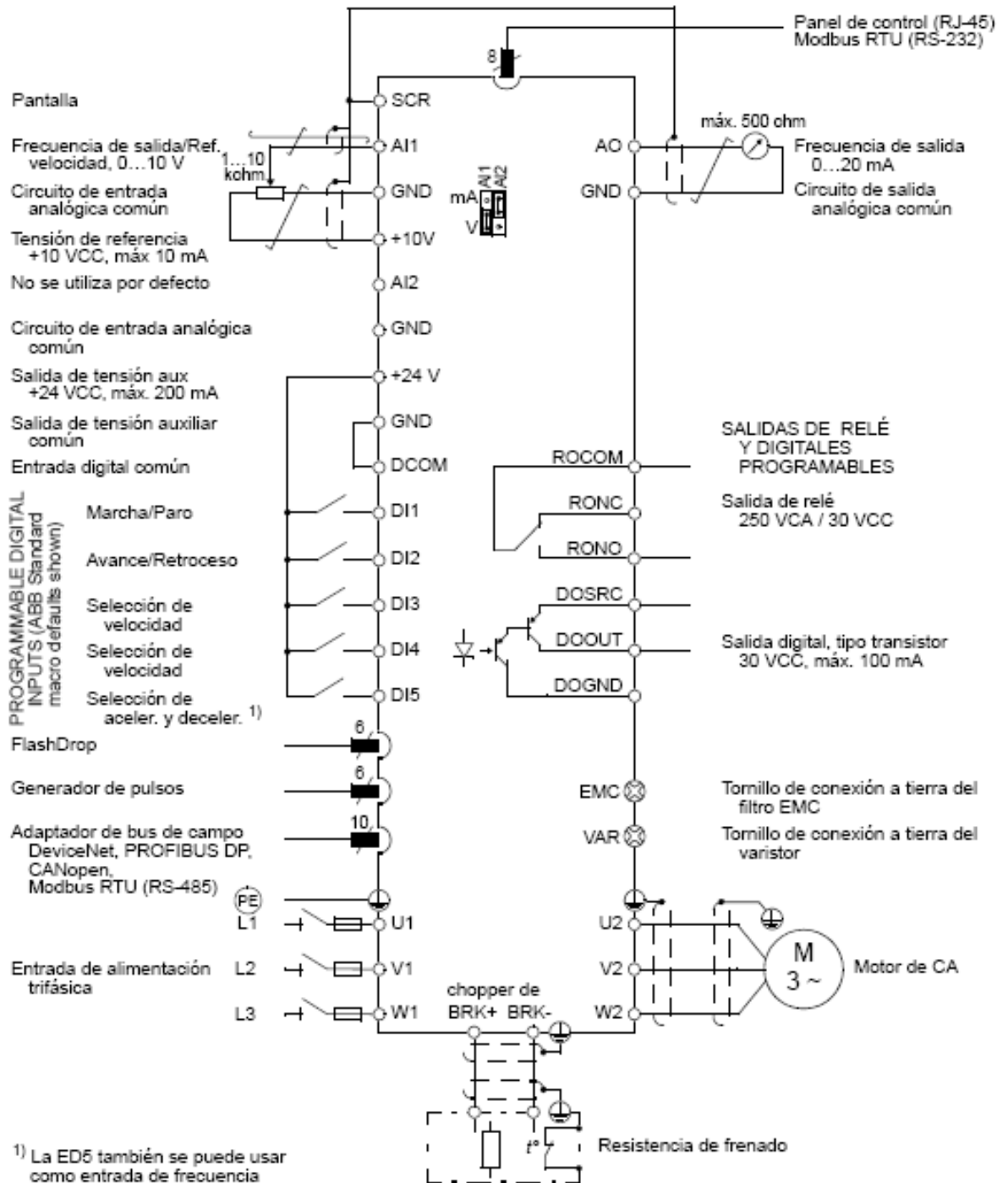
La conexión por defecto de las señales de control depende de la macro de aplicación utilizada, para este caso se escogió la macro estándar ABB.



Para el macro estándar se tiene la siguiente descripción de la conexión de los cables de control:



El siguiente diagrama proporciona una visión general de las conexiones. EL diagrama presenta las conexiones de E/S por defecto para el macro estándar ABB.




## 5. Parámetros a tener en cuenta para la programación del variador de velocidad











### LISTA DE TAREAS Y LOS PARAMETROS RELEVANTES DEL VARIADOR


En función de la selección efectuada en la tarea de aplicación (parámetro 9902 MACRO DE APLIC) el asistente de puesta en marcha decide que tareas subsiguientes sugiere.



Nombre	Descripción	Ajustar parámetros
Selección de idioma	Selección del idioma	9901
Ajuste del motor	Ajuste de los datos del motor Realización de la identificación del motor (si los límites de velocidad no se encuentran dentro del rango permitido: ajuste de los límites).	9904...9909 9910
Aplicación	Selección de la macro de aplicación	9902, parámetros asociados a la macro
Módulos opcionales	Activación de los módulos opcionales	Grupo 35 TEMP MOT MED Grupo 52 COMUNIC PANEL 9802
Control de velocidad EXT1	Selección del origen de la referencia de velocidad (si se usa EA1: ajuste de límites, escala e inversión de la entrada analógica EA1) Ajuste de los límites de referencia Ajuste de los límites de velocidad (frecuencia) Ajuste de los tiempos de aceleración y deceleración	1103 (1301...1303, 3001)  1104, 1105 2001, 2002, (2007, 2008) 2202, 2203
Control de velocidad EXT2	Selección del origen de la referencia de velocidad (si se usa EA1: ajuste de límites, escala e inversión de la entrada analógica EA1) Ajuste de los límites de referencia	1106 (1301...1303, 3001)  1107, 1108
Control de par	Selección del origen de la referencia de par (con EA1: ajuste de límites, escala e inversión de la entrada analógica EA1). Ajuste de los límites de referencia Ajuste de los tiempos de aumento y disminución de rampa de par	1106 (1301...1303, 3001)  1107, 1108 2401, 2402
Control PID	Selección del origen de la referencia de proceso (si se usa EA1: ajuste de límites, escala e inversión de la entrada analógica EA1). Ajuste de los límites de referencia Ajuste de los límites de velocidad (referencia) Ajuste del origen y los límites del valor actual de proceso	1106 (1301...1303, 3001)  1107, 1108 2001, 2002, (2007, 2008) 4016, 4018, 4019
Control de marcha/parado	Selección del origen de las señales de marcha y paro de los dos lugares de control externos, EXT1 y EXT2 Selección entre EXT1 y EXT2 Definición del control de dirección Definición de los modos de marcha y paro Selección del uso de la señal de Permiso de marcha	1001, 1002  1102 1003 2101...2103 1601
Funciones temporizadas	Ajuste de las funciones temporizadas  Selección del control temporizado de marcha y paro para los dos lugares de control externo, EXT1 y EXT2 Selección del control temporizado EXT1/EXT2 Activación de la velocidad constante 1 temporizada Selección del estado de la función temporizada indicado con la salida de relé SR Selección de la serie de parámetros 1/2 del PID1 temporizada	36 FUNCIONES TEMP  1001, 1002  1102 1201 1401 4027
Protecciones	Ajuste de los límites de par e intensidad	2003, 2017
Señales de salida	Selección de las señales indicadas con la salida de relé SR Selección de las señales indicadas con la salida analógica SA Ajuste del mínimo, máximo, escalado e inversión	Grupo 14 SALIDAS DE RELE Grupo 15 SALIDAS ANALOG


## PROGRAMACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL VARIADOR DE VELOCIDAD

ALIMENTACIÓN																						
<input type="checkbox"/> <p>Suministre alimentación de entrada. El panel de control básico arranca en Modo de Salida (Output).</p> <p>El panel de control asistente pregunta si desea ejecutar el Asistente de arranque. Si pulsa  el Asistente de arranque no se ejecuta y puede continuar con la puesta en marcha manual, de forma parecida a como se describe más adelante para el panel de control básico.</p>	<table border="1"> <tr> <td>REM</td> <td style="text-align: center;">0.0</td> <td>Hz</td> </tr> <tr> <td>OUTPUT</td> <td></td> <td>FWD</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>REM</td> <td colspan="2">ELECCION</td> </tr> <tr> <td colspan="3">¿Desea usar el asistente de arranque?</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">SI</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">No</td> </tr> <tr> <td>SALIR</td> <td>00:00</td> <td>ACEPTAR</td> </tr> </table>	REM	0.0	Hz	OUTPUT		FWD	REM	ELECCION		¿Desea usar el asistente de arranque?			SI			No			SALIR	00:00	ACEPTAR
REM	0.0	Hz																				
OUTPUT		FWD																				
REM	ELECCION																					
¿Desea usar el asistente de arranque?																						
SI																						
No																						
SALIR	00:00	ACEPTAR																				

ENTRADA MANUAL DE LOS DATOS DE ARRANQUE (grupo de parámetros 99)																																								
<input type="checkbox"/> <p>Si dispone de un panel de control asistente, seleccione el idioma (el panel de control básico no permite trabajar con otros idiomas). Véase el parámetro <a href="#">9901</a> para los valores de los idiomas disponibles.</p> <p>A continuación se describe el procedimiento general de ajuste de parámetros para el panel de control básico. Puede consultar instrucciones más detalladas para el panel de control básico en la página <a href="#">65</a>. Encontrará las instrucciones para el panel de control asistente en la página <a href="#">76</a>.</p> <p>El procedimiento de ajuste de parámetros general:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Para ir al menú principal, pulse  si la línea inferior muestra OUTPUT; en caso contrario pulse repetidamente  hasta que aparezca MENU en la parte inferior.</li> <li>2. Pulse las teclas / hasta que aparezca "PAR" y pulse .</li> <li>3. Busque el grupo de parámetros pertinente utilizando las teclas / y pulse .</li> <li>4. Busque el parámetro correspondiente en el grupo utilizando las teclas /.</li> </ol>	<table border="1"> <tr> <td>REM</td> <td colspan="2">EDICION PAR</td> </tr> <tr> <td colspan="3">9901 IDIOMA</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">INGLÉS</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">[0]</td> </tr> <tr> <td>CANCELAR</td> <td>00:00</td> <td>GUARDAR</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>REM</td> <td style="text-align: center;">rEF</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>MENU</td> <td>FWD</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>REM</td> <td style="text-align: center;">-01-</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>PAR</td> <td>FWD</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>REM</td> <td style="text-align: center;">2001</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>PAR</td> <td>FWD</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>REM</td> <td style="text-align: center;">2002</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>PAR</td> <td>FWD</td> </tr> </table>	REM	EDICION PAR		9901 IDIOMA			INGLÉS			[0]			CANCELAR	00:00	GUARDAR	REM	rEF			MENU	FWD	REM	-01-			PAR	FWD	REM	2001			PAR	FWD	REM	2002			PAR	FWD
REM	EDICION PAR																																							
9901 IDIOMA																																								
INGLÉS																																								
[0]																																								
CANCELAR	00:00	GUARDAR																																						
REM	rEF																																							
	MENU	FWD																																						
REM	-01-																																							
	PAR	FWD																																						
REM	2001																																							
	PAR	FWD																																						
REM	2002																																							
	PAR	FWD																																						

5. Pulse la tecla  y manténgala pulsada durante unos dos segundos hasta que aparezca el valor del parámetro con **SET** bajo el valor.

6. Modifique el valor con las teclas  . El valor cambia más rápidamente si mantiene la tecla pulsada.

7. Guarde el parámetro pulsando .

**Seleccionar la macro de aplicación (parámetro 9902).** El procedimiento de ajuste de parámetros general se ha facilitado con anterioridad.  
El valor de fábrica 1 (ESTAND ABB) es adecuado en la mayoría de los casos.

**Seleccionar el modo de control del motor (parámetro 9904).**  
1 (VECTOR:VELOC) es adecuado en la mayoría de casos. 2 (VECTOR:PAR) es adecuado para aplicaciones de control de par. 3 (ESCALAR:FREC) se recomienda:

- para convertidores multimotor cuando el número de motores conectados al convertidor es variable
- cuando la intensidad nominal del motor es inferior al 20 % de la intensidad nominal del convertidor
- cuando el convertidor se usa con fines de prueba sin un motor conectado

REM **1500** rpm  
PAR SET FWD

REM **1600** rpm  
PAR SET FWD

REM **2002**  
PAR FWD

REM **9902**  
PAR FWD

REM **9904**  
PAR FWD

**Introducir los datos del motor que figuran en la placa de características del motor:**

ABB Motors									
3 ~ motor M2AA 200 MLA 4									
IEC 200 ML 55									
No.									
Ins. cl. F					IP 55				
v	Hz	kW	r/min	A	cos φ	I/A/N	T/E/s		
690 Y	50	30	1475	32.5	0.83				
400 D	50	30	1475	56	0.83				
660 Y	50	30	1470	34	0.83				
380 D	50	30	1470	59	0.83				
415 D	50	30	1475	54	0.83				
440 D	60	35	1770	59	0.83				
Cat. no 3GAA 202 001 - ADA									
6312/C3			6210/C3			180 kg			
IEC 34-1									

380 V  
Tensión de alimentación

- tensión nominal del motor (parámetro 9905)
- intensidad nominal del motor (parámetro 9906)  
Rango permitido: 0,2...2,0 · I<sub>2N</sub> A
- frecuencia nominal del motor (parámetro 9907)
- velocidad nominal del motor (parámetro 9908)
- potencia nominal del motor (parámetro 9909)

REM **9905**  
PAR FWD

REM **9906**  
PAR FWD

REM **9907**  
PAR FWD



REM **9908**  
PAR FWD

REM **9909**  
PAR FWD











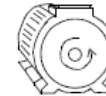
**Nota:** Ajuste los datos del motor exactamente al mismo valor que la placa de características del motor. Por ejemplo, si la velocidad nominal del motor es de 1.440 rpm en la placa, el ajuste del valor del parámetro 9908 VELOC NOM MOTOR a 1.500 rpm da lugar a un funcionamiento erróneo del convertidor.

<input type="checkbox"/>	<p>Seleccionar el método de identificación del motor (parámetro <b>9910</b>).</p> <p>El valor de fábrica 0 (OFF/IDMAGN) que utiliza la magnetización de identificación es adecuado para la mayoría de aplicaciones. Se aplica en este procedimiento de puesta en marcha básica. Sin embargo, hay que remarcar que esto requiere que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• el parámetro <b>9904</b> esté ajustado a 1 (VECTOR:VELOC) o 2 (VECTOR:PAR)</li> <li>• el parámetro <b>9904</b> esté ajustado a 3 (ESCALAR:FREC) y el parámetro <b>2101</b> a 3 (FLYSTART ESC) o a 5 (GIRAR+SOBREP).</li> </ul> <p>Si su selección es 0 (OFF/IDMAGN), vaya al paso siguiente.</p> <p>Se debe seleccionar el valor 1 (SI) si:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- el punto de funcionamiento está cerca de la velocidad cero, y/o</li> <li>- se requiere el funcionamiento en un rango de par por encima del par motor nominal en un amplio rango de velocidad y sin que se requiera realimentación de velocidad medida.</li> </ul> <p>Si decide realizar la Marcha de ID (valor 1 [SI]), prosiga siguiendo las instrucciones que se facilitan en la página <b>56</b> en la sección <b>Realización de una Marcha de ID</b> y, a continuación, vuelva al paso <b>DIRECCIÓN DE GIRO DEL MOTOR</b> en la página <b>51</b>.</p>
--------------------------	--

**MAGNETIZACIÓN DE IDENTIFICACIÓN CON SELECCIÓN DE LA MARCHA DE ID A 0 (NO)**

<input type="checkbox"/>	<p>Pulsar la tecla  para pasar a control local (se muestra LOC en la parte izquierda).</p> <p>Pulse  para poner en marcha el convertidor. En ese momento se calcula el modelo del motor magnetizando el motor durante 10 a 15 s a velocidad cero.</p>
--------------------------	---

**DIRECCIÓN DE GIRO DEL MOTOR**

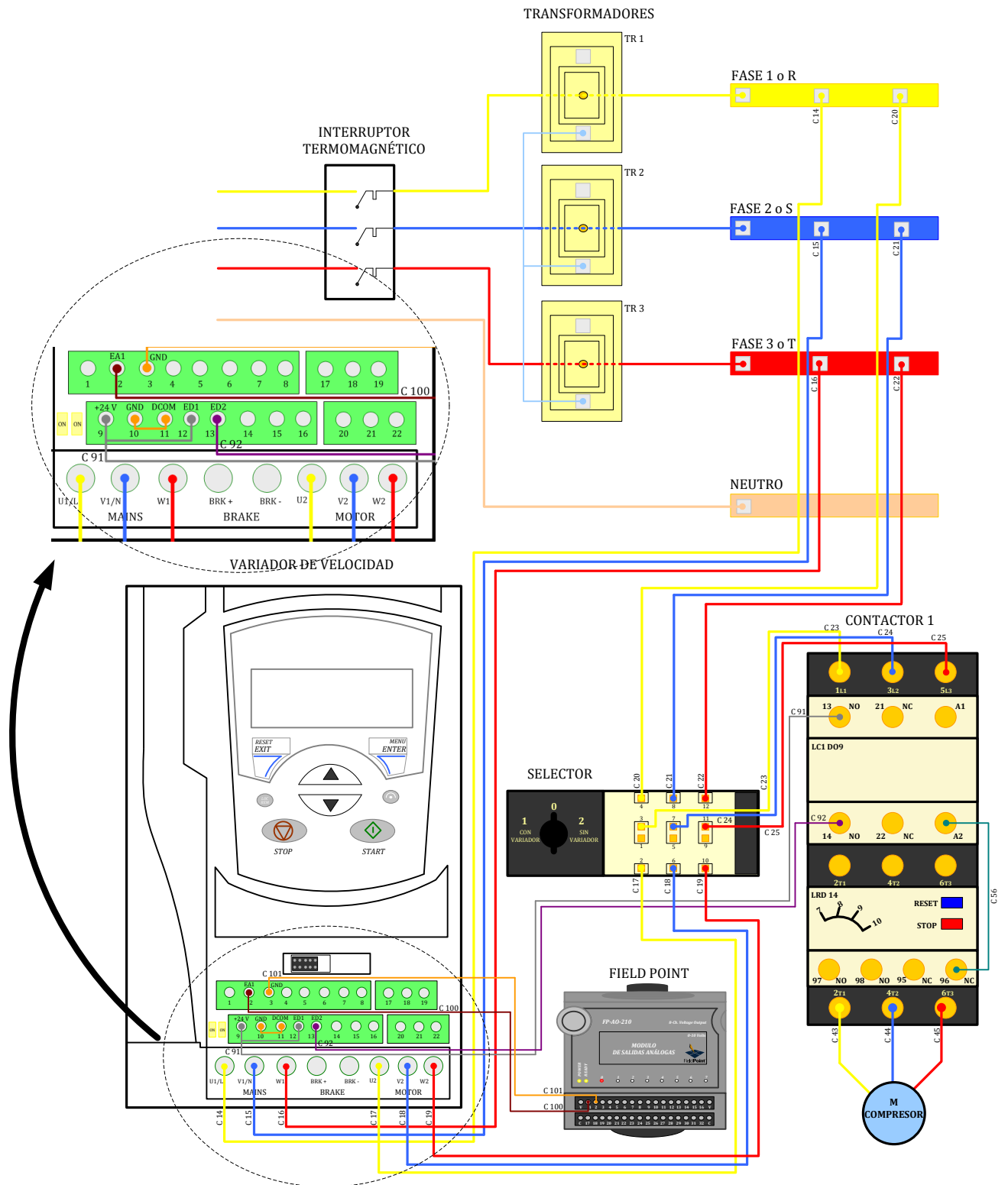
<p><input type="checkbox"/> Comprobar la dirección de giro del motor.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si el convertidor se encuentra en control remoto (se muestra REM en el lado izquierdo), pase a control local pulsando .</li> <li>• Para ir al menú principal, pulse  si la línea inferior muestra OUTPUT; en caso contrario pulse repetidamente  hasta que aparezca MENU en la parte inferior.</li> <li>• Pulse las teclas / hasta que aparezca "rEF" y pulse .</li> <li>• Aumente la referencia de frecuencia desde cero a un valor pequeño mediante la tecla .</li> <li>• Pulse  para arrancar el motor.</li> <li>• Comprobar que la dirección actual de giro del motor es la misma que se indica en la pantalla (FWD significa dirección de avance y REV dirección inversa).</li> <li>• Pulsar  para detener el motor.</li> </ul> <p>Para cambiar la dirección de giro del motor:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desconecte la alimentación de entrada del convertidor y espere durante 5 minutos a que los condensadores del circuito intermedio se descarguen. Mida la tensión entre cada terminal de entrada (U1, V1 y W1) y efectúe la conexión a tierra con un multímetro para verificar que el convertidor se haya descargado.</li> <li>• Intercambie la posición de dos conductores de fase del cable a motor en los terminales de salida del convertidor o en la caja de conexiones del motor.</li> <li>• Verifique su trabajo; para ello suministre alimentación de entrada y repita la comprobación como se ha descrito anteriormente.</li> </ul>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 20px;"> <p style="text-align: left; margin: 0;">LOC</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em; margin: 0;"><b>XXX</b> Hz</p> <p style="text-align: center; margin: 0;"><b>SET</b> FWD</p> </div> <div style="margin-bottom: 20px;">  <p style="margin-left: 10px;">dirección de avance</p> </div> <div>  <p style="margin-left: 10px;">dirección inversa</p> </div>
--	--

LÍMITES DE VELOCIDAD Y TIEMPOS DE ACELERACIÓN/DECELERACIÓN		
<input type="checkbox"/>	Ajustar la velocidad mínima (parámetro <a href="#">2001</a> ).	LOC 2001 PAR FWD
<input type="checkbox"/>	Ajustar la velocidad máxima (parámetro <a href="#">2002</a> ).	LOC 2002 PAR FWD
<input type="checkbox"/>	Ajustar el tiempo de aceleración 1 (parámetro <a href="#">2202</a> ). <b>Nota:</b> si se van a emplear dos tiempos de aceleración en la aplicación, compruebe también el tiempo de aceleración 2 (parámetro <a href="#">2205</a> ).	LOC 2202 PAR FWD

<input type="checkbox"/>	Ajustar el tiempo de deceleración 1 (parámetro <a href="#">2203</a> ). <b>Nota:</b> si se van a emplear dos tiempos de deceleración en la aplicación, compruebe también el tiempo de deceleración 2 (parámetro <a href="#">2206</a> ).	LOC 2203 PAR FWD
--------------------------	---	------------------------

GUARDAR UNA MACRO DE USUARIO Y COMPROBACIÓN FINAL		
<input type="checkbox"/>	En estos momentos la puesta en marcha ya se ha completado. Sin embargo, en este momento puede resultar útil ajustar los parámetros requeridos por su aplicación y guardar los ajustes como una macro de usuario, tal como se explica en la sección <a href="#">Macros de Usuario</a> en la página <a href="#">96</a> .	LOC 9902 PAR FWD
<input type="checkbox"/>	Compruebe que el estado del convertidor sea correcto. Panel de control básico: Compruebe que en la pantalla no se muestran fallos ni alarmas. Si desea comprobar los LED en la parte frontal del convertidor, pase a control remoto (en caso contrario se genera un fallo) antes de retirar el panel y verificar que el LED rojo no está encendido y que el LED verde está encendido pero sin parpadear. Panel de control asistente: Compruebe que en la pantalla no se muestran fallos ni alarmas y que el LED del panel está verde y sin parpadear.	
<b>El convertidor ya está listo para su uso.</b>		

## 6. CONEXIÓN FINAL DEL VARIADOR DE VELOCIDAD DEL CUARTO FRÍO



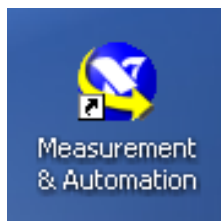
**ANEXO D: GUÍA DE FUNCIONAMIENTO DEL HARDWARE Y SOFTWARE DE  
MONITOREO Y CONTROL**

## GUÍA DE FUNCIONAMIENTO DEL HARDWARE Y SOFTWARE DE MONITOREO Y CONTROL

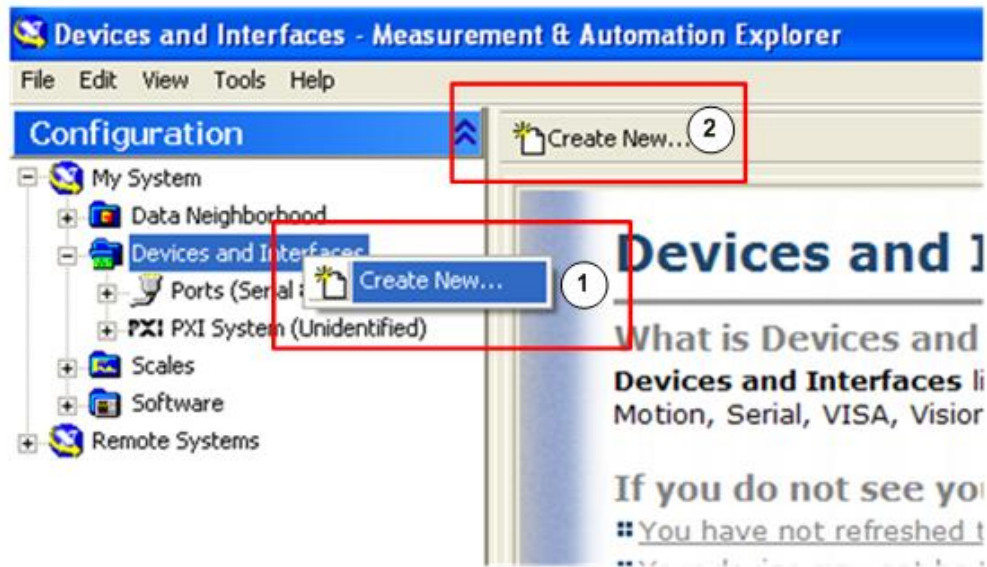
Lo primero que se debe hacer es revisar las conexiones de todos los equipos antes de energizar la caja de control, posteriormente se enciende el interruptor termomagnético y se prende el interruptor de botón del Field Point. Se procede a conectar el cable RS-232 al PC que permitirá la comunicación entre Field Point y el PC.

El programa de control y monitoreo implementado para la toma de datos de los diferentes controles fue realizado en Labview, para poder abrir y configurar los Field Points se debe seguir el siguiente procedimiento:

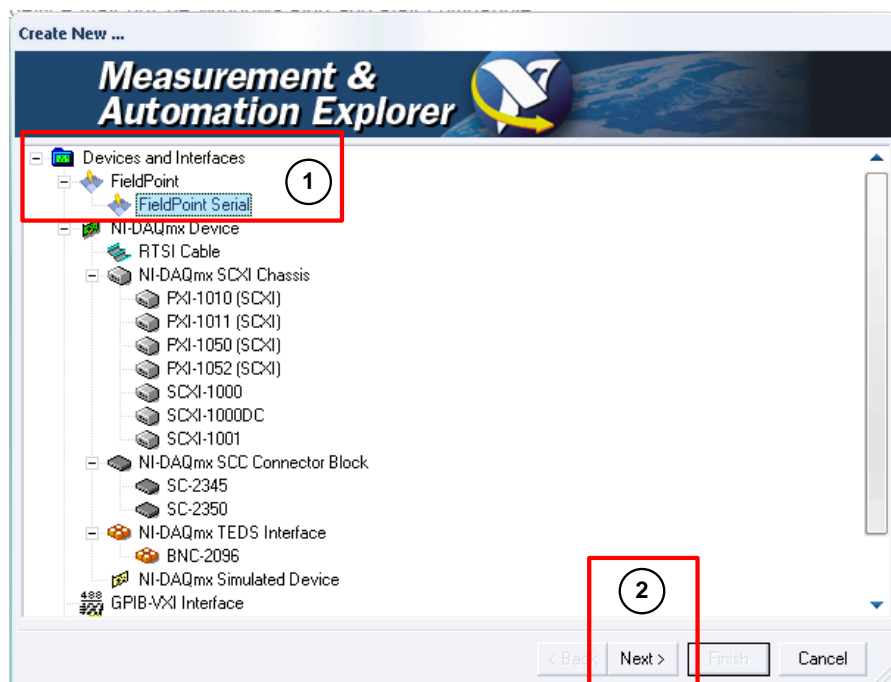
1. Abrir el Measurement & Automation, este es el software que permite configurar los diferentes canales de los diferentes Field points. Para acceder a este programa se puede desde inicio-programa-National Instruments-MAX o simplemente desde el escritorio donde se encuentra el siguiente icono:



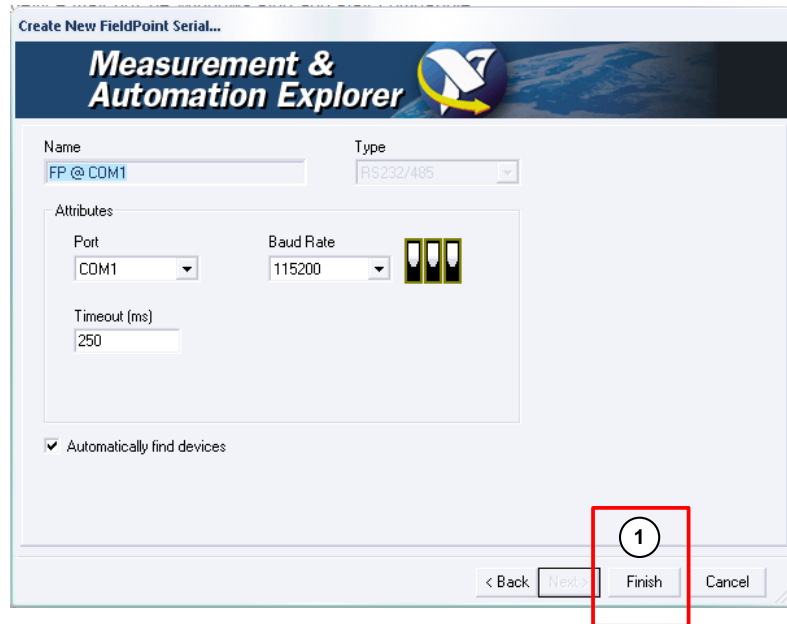
2. Posteriormente se abrirá una pantalla como la mostrada en la figura, que permitirá configurar el hardware Field Point, hay dos maneras de hacerlo: la primera es siguiendo la ruta Configuración/My System/Devices and Interfaces click derecho y seleccionar crear uno nuevo o simplemente seleccionar Device and Interfaces del menú de configuración y dar click a Crear nuevo que aparece en la parte derecha.



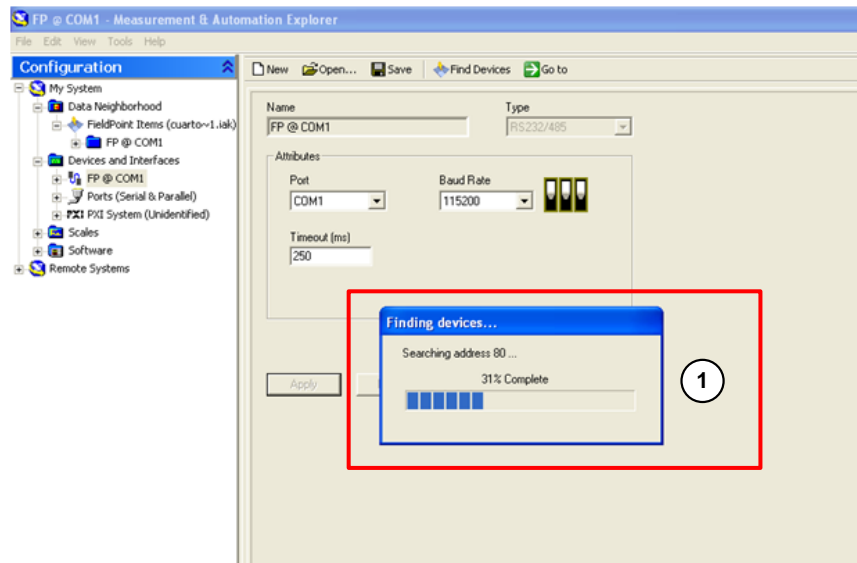
3. Al dar click en crear nuevo aparece la siguiente pantalla, se selecciona Devices and Interfaces/FieldPoint/FieldPoint Serial y se da click al botón next.



4. En la siguiente ventana donde sale el nombre del instrumento y el puerto donde lo va a leer se le da click en el botón finish.

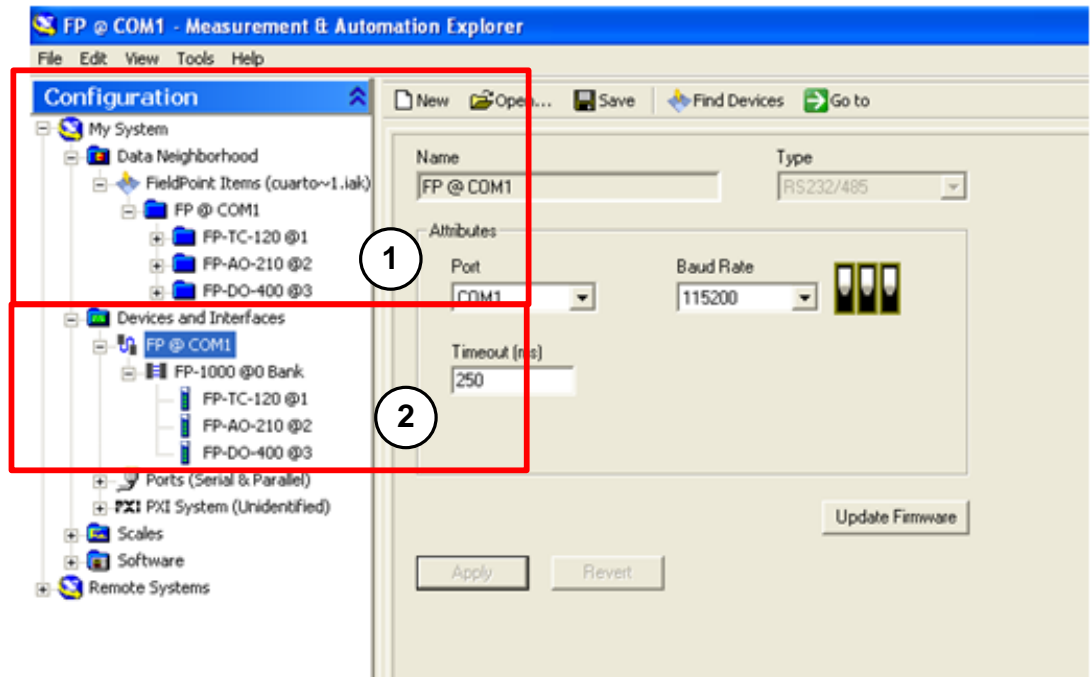


5. Automáticamente el software empieza a buscar y reconocer el modulo de FieldPoint mostrando en la pantalla el porcentaje completado de la búsqueda.

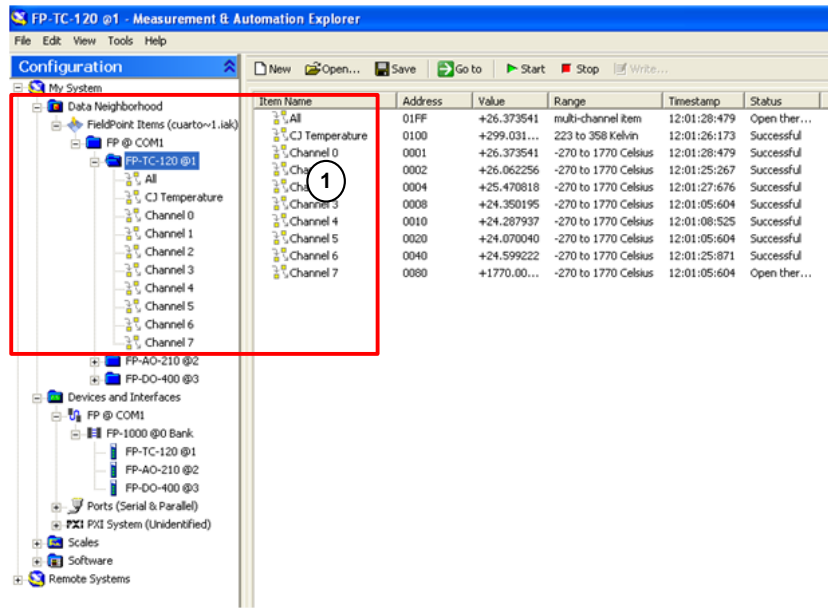


6. Cuando el porcentaje de búsqueda llega al 100% aparecen al lado derecho de la pantalla dos rutas:

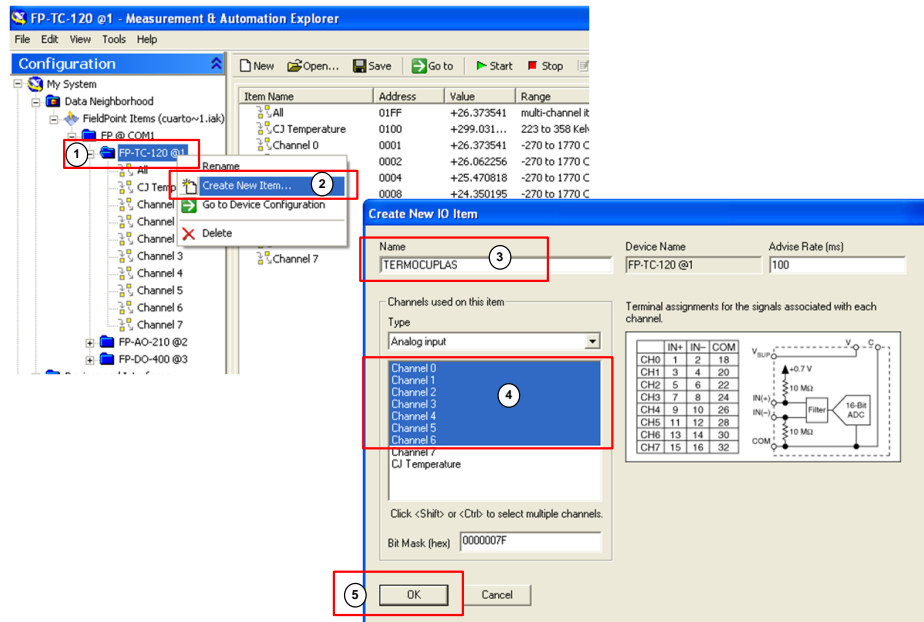
- a. Configuration/ My System / Data Neighborhood /Fieldpoint Item / FP@COM1 donde aparecen todos los ítems de los módulos de FieldPoint conectados en ese momento por medio del cable RS-232 al PC.
- b. Configuration/ My System / Devices and Interfaces/ FP@COM donde aparecen todos los módulos que conforman el FP@COM1.



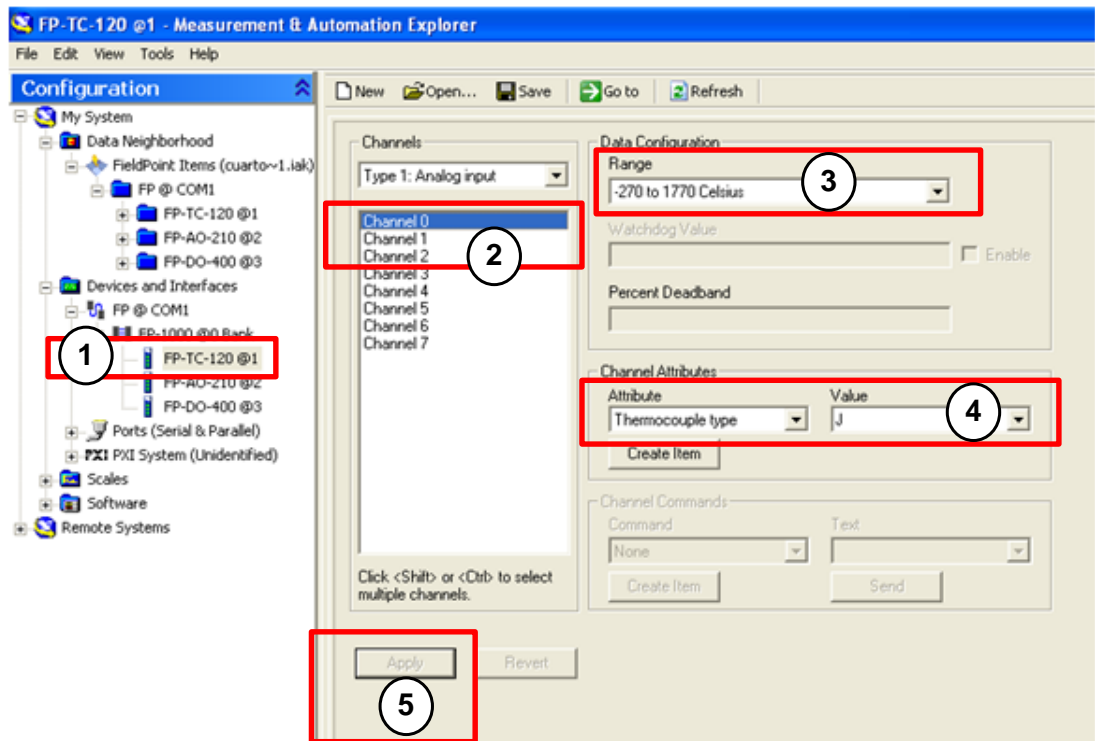
7. Por medio de la ruta (a) nombrada en el ítem anterior se puede reunir varios canales con un solo nombre para posteriormente cuando se requieran usar no se tenga que configurar uno por uno. Por ejemplo, al dar click en la carpeta FP-TC-120@1 se muestran todos los 8 canales que conforman ese modulo.



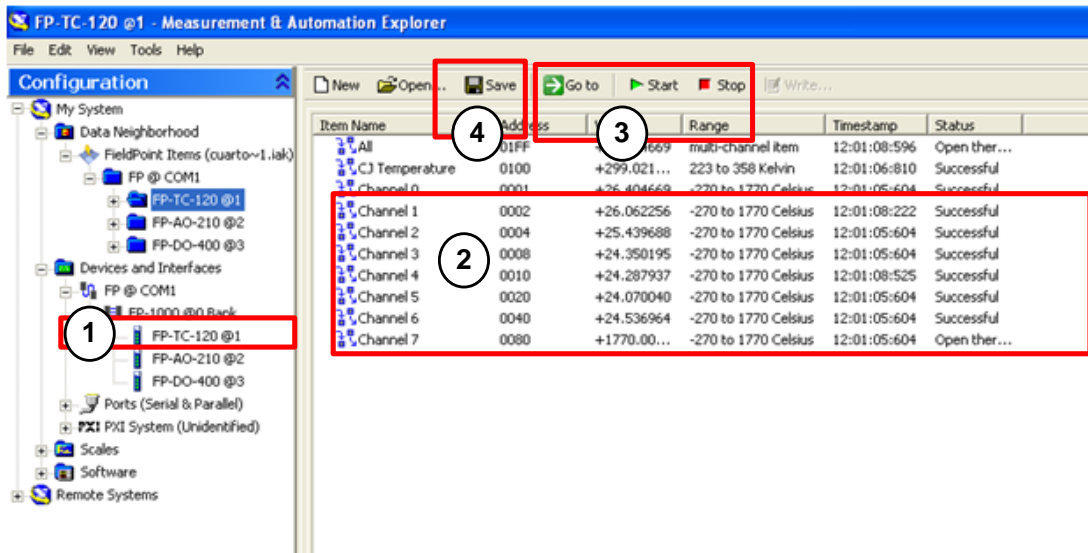
8. Para crear un nuevo ítem se da click derecho en la carpeta FP-TC-120@1 y en el menú desplegable se escoge crear nuevo ítem dando origen a una nueva pantalla en la parte superior se coloca el nombre del nuevo ítem y posteriormente se seleccionan los canales que van a conformar ese nuevo ítem manteniendo a la vez presionado el botón ctrl y dando click sobre el canal que se desee incluir en el nuevo ítem.



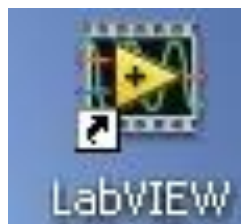
9. Para configurar los canales de los diferentes módulos se da click en el modulo y al lado derecho aparece una ventanita donde se listan los canales que conforman el modulo, se selecciona el canal y se le cuadra las unidades y el rango de operación, en el caso del modulo de termocuplas el tipo de termocupla usada. Se da click en aplicar y los cambios quedan automáticamente hechos.



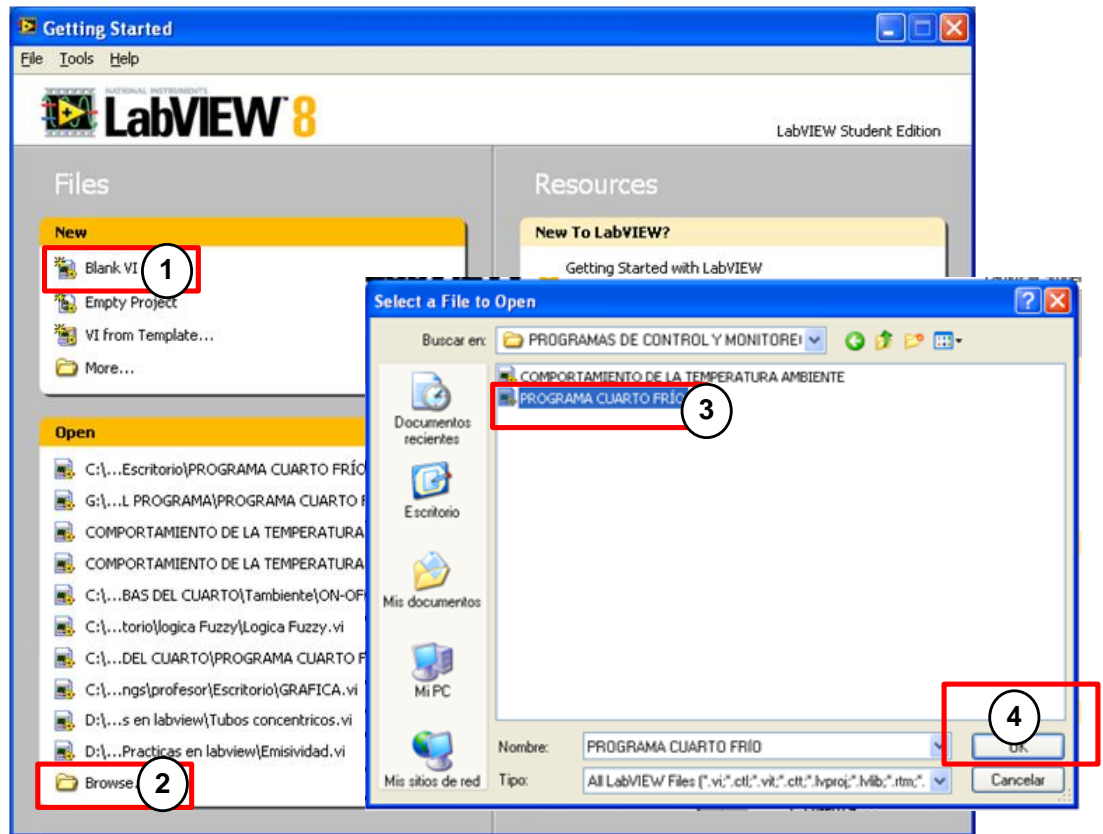
10. Para verificar que todos los canales de los módulos en uso estén sirviendo se le da click en el modulo que se quiere probar y en la pantalla derecha se le da click en el botón Go to donde sale una pantalla de todos los canales en servicio mostrando si están o no conectados, el rango de operación.



11. Se cierra el MAX y se realiza el mismo procedimiento descrito en el punto 1 pero ahora para abrir el LabVIEW. Abrir LabVIEW, este es el software de entorno grafico de programación que permite realizar la programación del monitoreo, almacenamiento de datos y control. Para acceder a este programa se puede desde inicio-programa-National Instruments-LabVIEW o simplemente desde el escritorio donde se encuentra el siguiente icono:

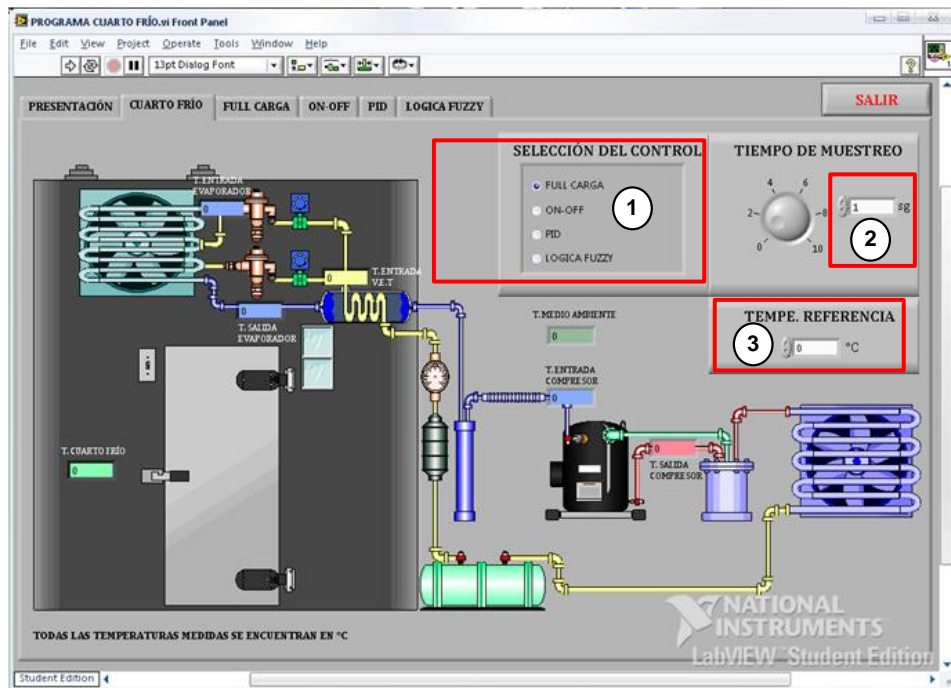


12. Se ejecuta el programa y aparece una ventana como la que se muestra donde se puede buscar un archivo existente o simplemente crear uno nuevo. El programa realizado para este estudio se encuentra en el escritorio del PC del laboratorio de Plantas Térmicas en una carpeta llamada programa de control y monitoreo del cuarto frío.

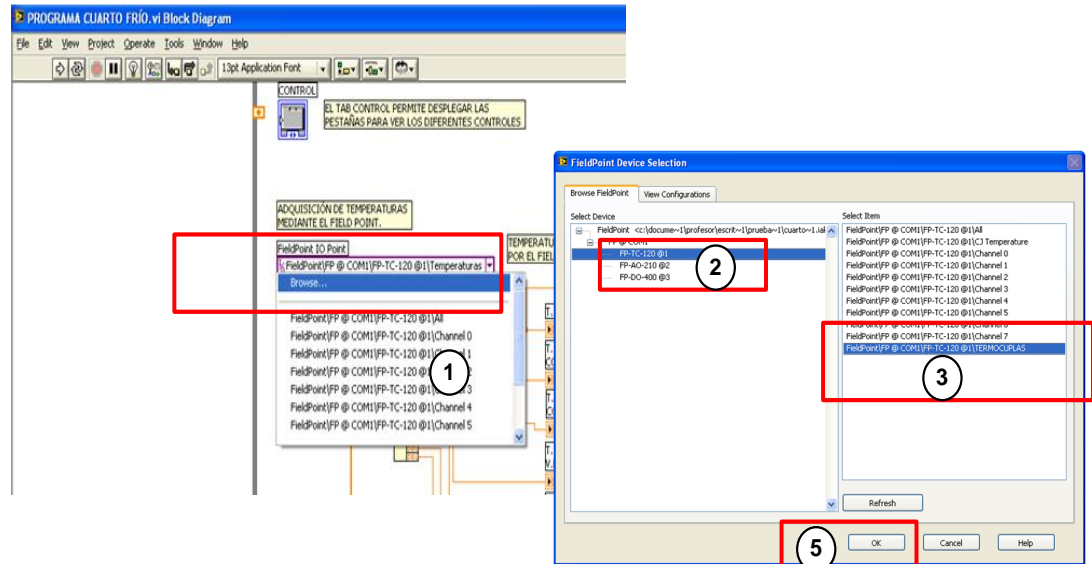


13. Automáticamente el panel frontal del programa seleccionado en el ítem anterior abre. En la pestaña cuarto frío se debe escoger el tipo de control que se desea usar, el tiempo de monitoreo y la temperatura de vaporación para las que se van a realizar las pruebas. Para cambiar la ventana del panel frontal por el diagrama de bloque se da ctrl + un click.

14. Posteriormente llenados estos datos se procede a verificar en el diagrama de bloque que los canales de donde se van a leer o enviar señales correspondan a los que se hallan configurado en el MAX.



15. En el diagrama de bloque seleccionar los FieldPoint, le da browser y sale una pantalla al lado que permite seleccionar el I/O canal deseado colocar.



16. Cumpliendo con los pasos anteriores se procede a ejecutar el programa para poder realizar pruebas.

**ANEXO E: GUÍA DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN  
Y AIRE ACONDICIONADO**

**PRACTICA:  
DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGETICO DE UN SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN EN CARGA PARCIAL CON CONTROL CONTINUO  
Y ON-OFF**



**DANIEL EDUARDO BARAJAS MERCHÁN  
MARTHA LILIANA GÓMEZ SARMIENTO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO  
BUCARAMANGA  
2009**

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Determinar el consumo energético de un sistema de refrigeración en carga parcial con control continuo y control ON-OFF.

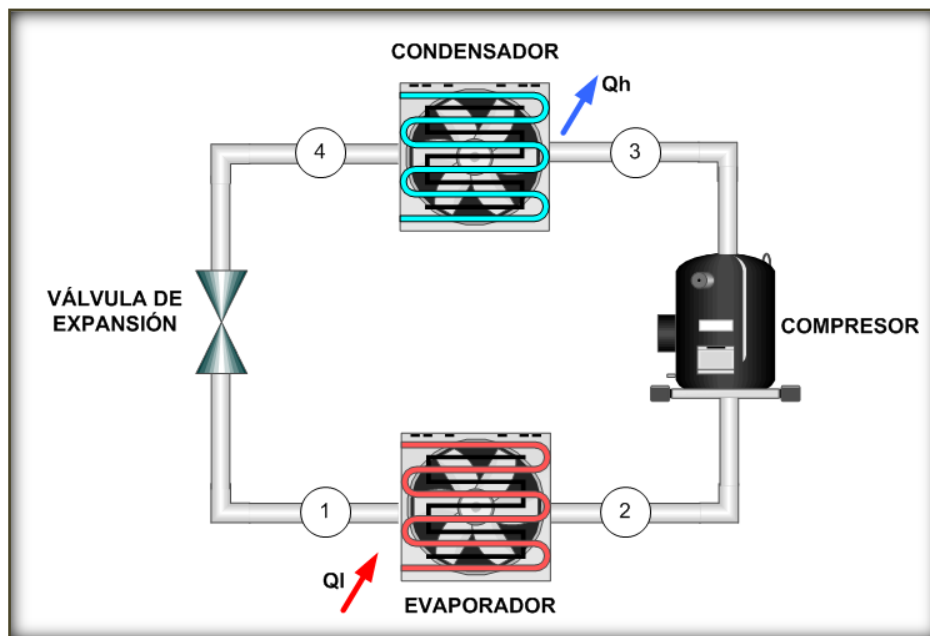
### OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la variación de la capacidad con la temperatura de evaporación de un sistema de refrigeración.
- Determinar el consumo energético de las estrategias de control (ON-OFF, control continuo con PID y lógica fuzzy) por medio de la medición del amperaje y voltaje de cada una de ellas.
- Comparar el consumo energético de las tres estrategias de control (ON-OFF, control continuo con PID y lógica fuzzy) del cuarto frío del laboratorio de refrigeración.
- Ver la influencia de la temperatura ambiente en el comportamiento del sistema de refrigeración.
- Realizar las curvas:
  - a. Temperatura ambiente Vs. Tiempo.
  - b. Temperatura de evaporación Vs. Tiempo.
  - c. Potencia Vs. Tiempo.
  - d. Energía Vs. Tiempo.

## MARCO TEÓRICO

### INTRODUCCIÓN

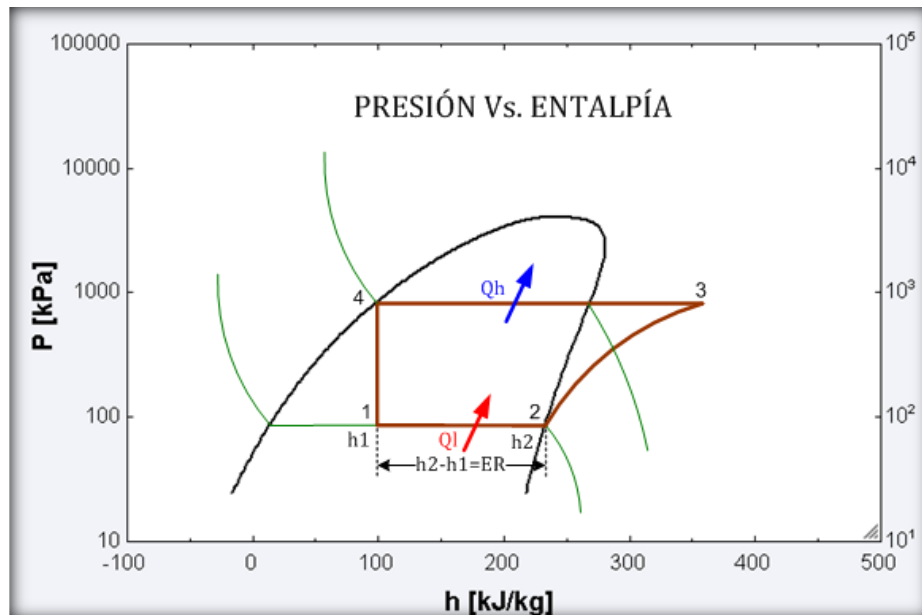
Los sistemas de refrigeración consisten en ciclos termodinámicos, mediante los cuales es posible tomar un flujo de calor de una fuente de baja temperatura y trabajo u otra fuente de energía para transmitir calor a un sumidero de mayor temperatura. El ciclo termodinámico se realiza utilizando una sustancia de trabajo que se denomina refrigerante, la cual cambia de estado durante el ciclo, permitiendo la transferencia de calor mencionada. El ciclo básico de un sistema de refrigeración por compresión de vapor consta principalmente de 4 elementos: evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión, como se puede apreciar en la figura.



**Componentes principales de un sistema de refrigeración por compresión de vapor.**

El ciclo termodinámico de funcionamiento de un sistema de compresión de vapor es el siguiente:

- **Compresión (2-3):** En el compresor, el refrigerante entra en forma de vapor saturado a baja presión y recibe un trabajo mecánico que eleva su presión, temperatura y entalpía hasta llevarlo a un estado de vapor sobrecalentado.
- **Condensación (3-4):** Luego, en el condensador, el refrigerante es enfriado pasando por vapor saturado a alta presión y posteriormente hasta condensarlo, entregando al ambiente energía en forma de calor.
- **Expansión (4-1):** Posteriormente este líquido a presión pasa por un dispositivo de estrangulación que lo expande súbitamente llevándolo al estado de vapor húmedo a baja presión, lo cual a su vez enfría el refrigerante preparándolo para ser la fuente de frío del proceso.
- **Evaporación (1-2):** Finalmente, en el evaporador el refrigerante extraerá calor del material refrigerado para pasar de nuevo al estado de vapor saturado a baja presión, el cual pasa al compresor cerrando el ciclo.



**Ciclo termodinámico de un sistema de refrigeración por compresión de vapor.**

## CAPACIDAD DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

**Definición.** La capacidad de un sistema de refrigeración corresponde a la cantidad de calor que el refrigerante es capaz de sacar del medio refrigerado y es igual al producto de la masa del refrigerante circulado por unidad de tiempo por la diferencia de entalpías del refrigerante entre la salida y entrada del evaporador.

$$CAP = \dot{m}_r \times ER = \rho_v \times \dot{V}_r \times ER$$
$$CAP = \rho_v \times \left( \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L \times RPM \times N \right) \times \varepsilon_T \times (h_2 - h_1) \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_T = 1 - f \times c \left( \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Donde:

$\dot{m}_r$ : Flujo másico de refrigerante.

ER: Efecto refrigerante, igual a  $h_2 - h_1$ .

$\rho_v$ : Densidad del vapor.

$\dot{V}_r$ : Caudal de refrigerante.

D: Diámetro del cilindro.

L: Carrera del cilindro.

RPM: Revoluciones por minuto del compresor.

N: Número de cilindros.

$\varepsilon_T$ : Eficiencia total.

$h_2 - h_1$ : Diferencia entalpías del refrigerante en el evaporador, equivalente a ER.

f: Factor de incremento, está entre 1.1 y 1.2.

c: Claro del pistón. (0.05 normalmente o menos).

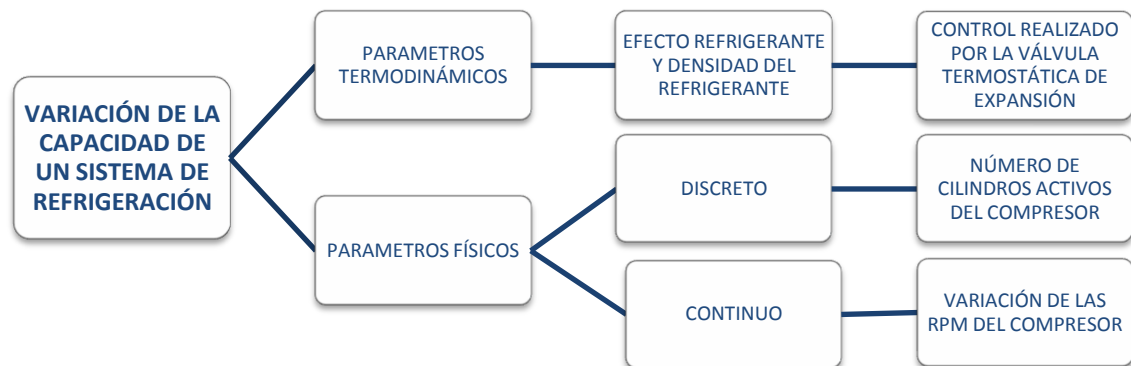
$P_d$ : Presión de descarga del compresor.

$P_s$ : Presión de succión del compresor.

n: Exponente politrópico de compresión.

## Variación de la capacidad de un sistema de refrigeración.

De acuerdo a la ecuación (1.1) la capacidad de un sistema de refrigeración es afectada por dos tipos de parámetros: los termodinámicos (densidad y efecto refrigerante) y los físicos (geometría de los pistones del compresor), es por eso que la capacidad varía al cambiar alguno de ellos afectando directamente la temperatura de vaporación que este manejando el sistema. Las formas en las que se puede variar la capacidad de un sistema de refrigeración se muestran en la figura y se explicarán a continuación.



Formas de variar la capacidad de un sistema de refrigeración.

## ESTRATEGIAS DE CONTROL

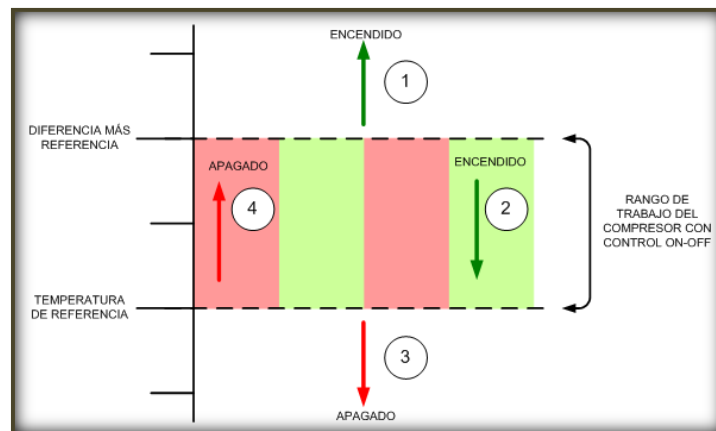
En los sistemas de refrigeración se manejan dos estrategias de control:

### Estrategia de control ON-OFF

Esta estrategia funciona por estados tal y como se describe a continuación:

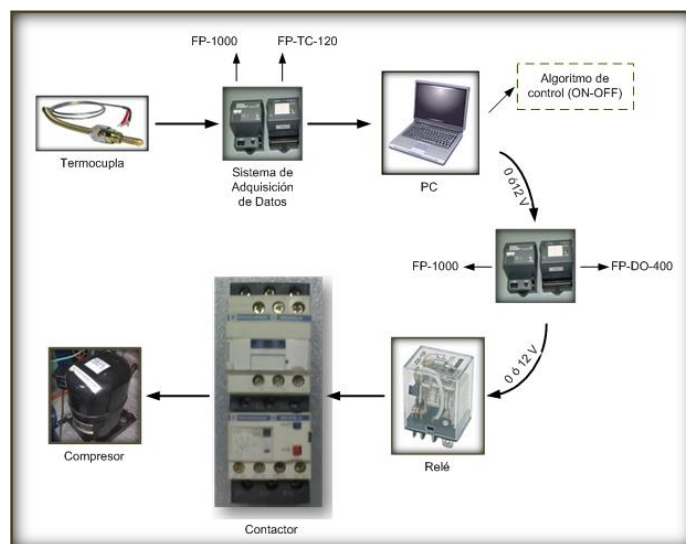
- Estado 1: Si la temperatura de vaporación es mayor o igual a la referencia más la diferencia, el compresor está prendido.

- Estado 2: Si la temperatura de vaporación es menor que la referencia más la diferencia y mayor que la referencia y viene del estado 1, el compresor está prendido.
- Estado 3: Si la temperatura de vaporación es menor o igual que la referencia, el compresor está apagado.
- Estado 4: Si la temperatura de vaporación es menor que la referencia más la diferencia y mayor que la referencia y viene del estado 3, el compresor está apagado.



**Funcionamiento del algoritmo de control ON-OFF**

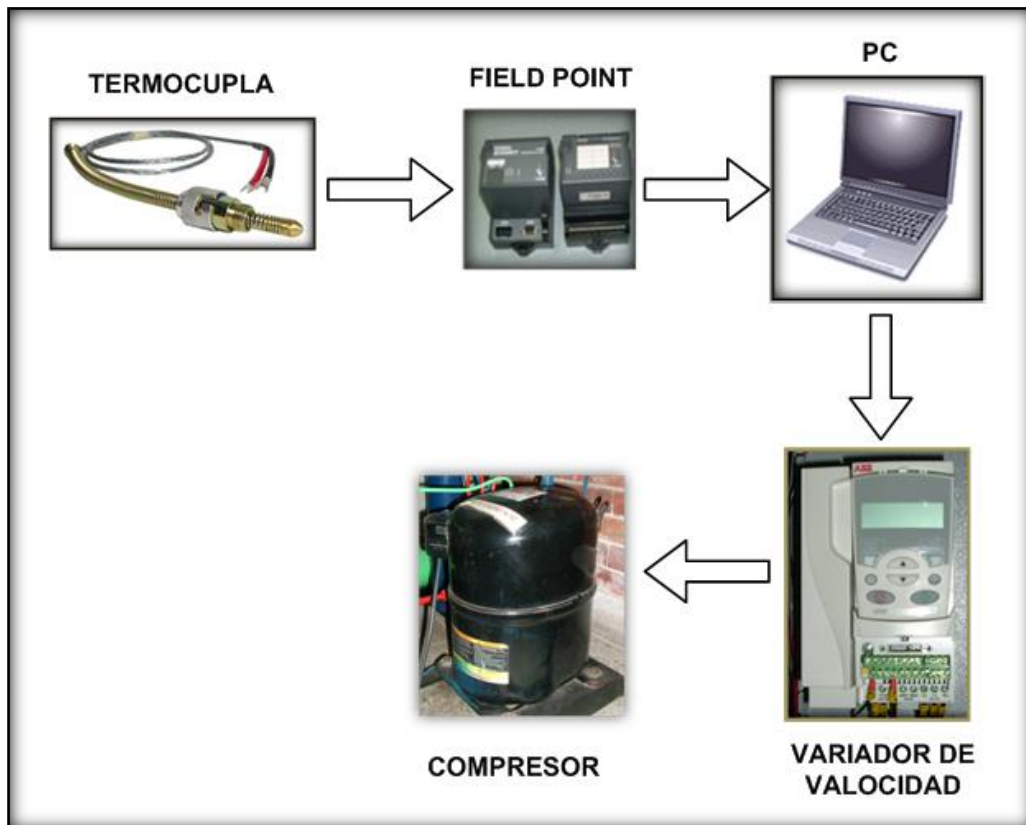
En el cuarto frío se encuentra implementada tal y como se muestra en la figura.



**Estrategia de control ON-OFF implementada en el cuarto frío.**

## Estrategia de control continuo

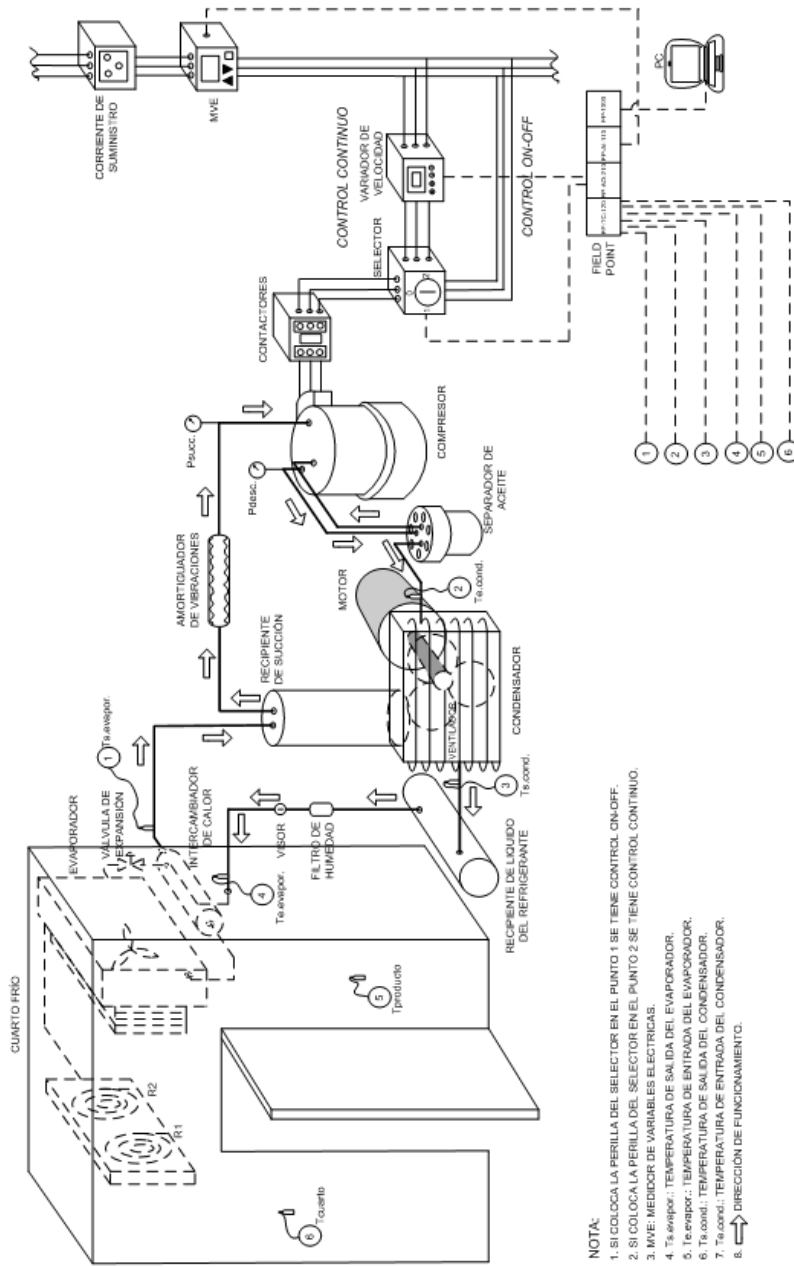
En esta estrategia el compresor siempre se encuentra prendido, variando sus RPM para poder adaptar la capacidad a la a carga impuesta en un momento dado manteniendo constante la temperatura de vaporación. Se implementa mediante un hardware y software de control basados en PC con algoritmos de control PID y FUZZY. En la figura se puede observar los componentes que forman parte de este tipo de control.



Estrategia de control continuo basado en PC.

# DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA

## DIBUJO DEL BANCO



## **EQUIPO UTILIZADO**

- Sistema de refrigeración: elementos principales, accesorios y elementos de automatización.
- Termocuplas
- Computador
- Sistema de adquisición de datos Field Point de National Instruments.
- Pinza amperimétrica
- Pinza Erasmus
- Autotransformador variable

## **PROCEDIMIENTO**

Se realizarán cuatro pruebas para la determinación del consumo energético del sistema de refrigeración con las estrategias de control ON-OFF y control continuo.

### **PRUEBA 1: DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA AL 100%**

1. Determinar la temperatura de evaporación o del producto para la cual se desea realizar las pruebas,  $T_{eva} = 0^{\circ}\text{C}$  y  $-5^{\circ}\text{C}$ .
2. Se prende el sistema de refrigeración y se espera hasta alcanzar dicha temperatura según sea el caso.
3. Al llegar a la temperatura de evaporación correspondiente por medio del programa de LABVIEW se determina la capacidad al 100% a la temperatura de evaporación seleccionada, sumando las respectivas cargas.
4. Posteriormente, como se desea trabajar a carga parcial a la capacidad encontrada se le sacara el 20% y 60%, variando la carga por resistencias por medio del autotransformador variable.

## **PRUEBA 2: CONTROL ON-OFF**

1. Se cuadra la capacidad a la cual se desea trabajar (20 ó 60%) y la temperatura de evaporación ( $T_{eva} = 0^{\circ}\text{C}$  y  $-5^{\circ}\text{C}$ ).
2. Se monitorea durante 2 horas el control de la temperatura de evaporación.
3. Posteriormente se repite la prueba pero ahora se impondrán perturbaciones por medio de la apertura de puerta durante 30 segundos cada 30 minutos.

## **PRUEBA 3: CONTROL CONTINUO CON PID**

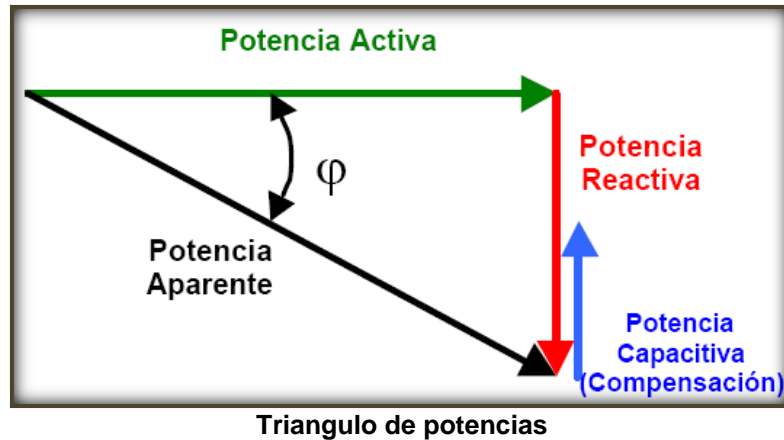
1. Se establece la temperatura y capacidad de trabajo al igual que en la práctica anterior.
2. Se monitorea: las temperaturas, el amperaje y el factor de potencia cada 30 segundos durante las 2 horas.
3. Se repite la practica pero ahora con perturbaciones debido a la apertura de puertas cada 30 minutos.

## **PRUEBA 4: CONTROL CONTINUO CON LOGICA FUZZY**

1. Se establece la temperatura y capacidad de trabajo al igual que en la práctica anterior.
2. Se monitorea: las temperaturas, el amperaje y el factor de potencia cada 30 segundos durante las 2 horas.
3. Se repite la practica pero ahora con perturbaciones debido a la apertura de puertas cada 30 minutos.

## ECUACIONES UTILIZADAS

Las ecuaciones empleadas en los cálculos de los tipos de potencia de un sistema se derivan del triángulo de potencias mostrado en la figura.



- Potencia aparente

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \text{ Volt} - \text{Amper} [VA] \quad (4.1)$$

- Potencia activa

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \text{ Watts} [W] \quad (4.2)$$

- Potencia reactiva

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi \text{ Volt} - \text{AmperReactivo} [VAr] \quad (4.3)$$

- Factor de potencia

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (4.4)$$

- Compensación

$$Q_{faltante} = (\tan \phi_{actual} - \tan \phi_{deseada}) \times P \quad (4.5)$$

Para determinar la potencia demandada por el compresor en el control ON-OFF se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = \sqrt{3} \times I_{rms} \times V_{rms} \times \cos \phi \quad (4.6)$$

Para determinar la potencia demandada por el compresor en el control continuo se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{T} \int P(t) \times dt = \sum_{K=1}^N V_{rmsK} \times I_{rmsK} \times \cos \phi_K \quad (4.7)$$

Para calcular la energía consumida en cada estrategia de prueba se usa la siguiente ecuación:

$$E = \sum_{i=0}^n P_i \times t_i \quad (4.8)$$

Donde:

V: Tensión en las líneas

I: Corriente en las líneas

$\cos \phi$ : Factor de potencia


$Q_{faltante}$ : Potencia capacitiva faltante [KVAR]

$t_i$ : Tiempo en que se realiza cada medición.

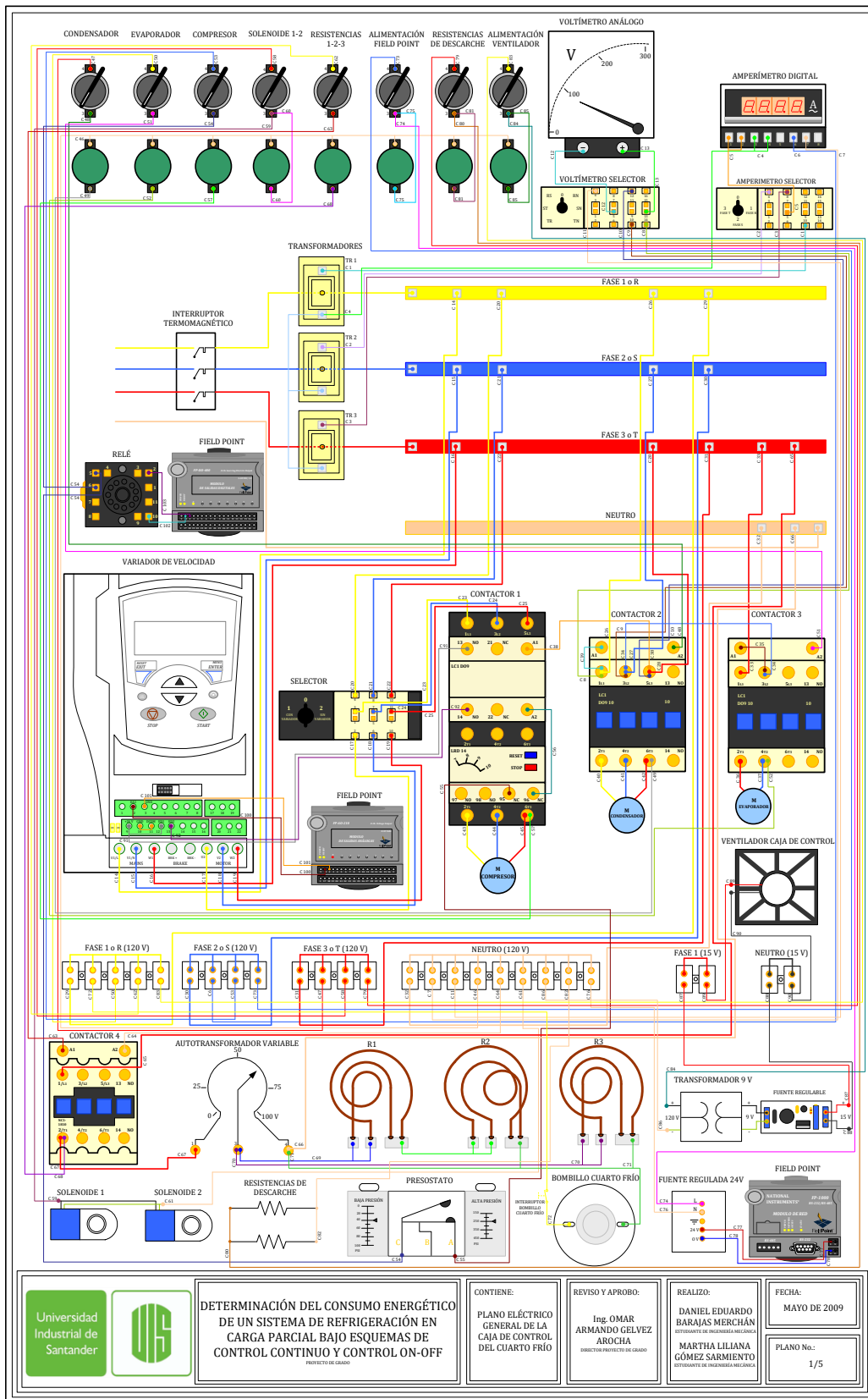




## TABLA DE RESULTADOS

			ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			PRUEBA: _____		
			REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO			FECHA: _____		
HORA: _____								
ENCARGADO: _____								
$T_{REFERENCIA}$ : _____		CAPACIDAD: _____	CONTROL: _____		PERTURBACIONES		SI	
							NO	
TEMPERATURA	CAPACIDAD	PERTURBACIÓN	CONSUMO DE ENERGÍA			AHORROS		
			ON-OFF	PID	FUZZY	% AHORRO PID Vs. ON-OFF	% AHORRO FUZZY Vs. ON-OFF	% AHORRO FUZZY Vs. PID
-5	60%	CP						
-5	60%	SP						
0	60%	CP						
0	60%	SP						
-5	20%	CP						
-5	20%	SP						
0	20%	CP						
0	20%	SP						

**ANEXO F: PLANOS: ELECTRICO, DE POTENCIA, DE CONTROL, ESQUEMA  
DE FUNCIONAMIENTO DEL CUARTO FRÍO Y MODULOS FIELD POINT**



**DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN CARGA PARCIAL BAJOS ESQUEMAS DE CONTROL CONTINUO Y CONTROL ON-OFF**  
PROYECTO DE GRADO

CONTIENE:  
PLANO ELÉCTRICO GENERAL DE LA CAJA DE CONTROL DEL CUARTO FRÍO

REVISÓ Y APROBO:  
Ing. OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
DIRECTOR PROYECTO DE GRADO

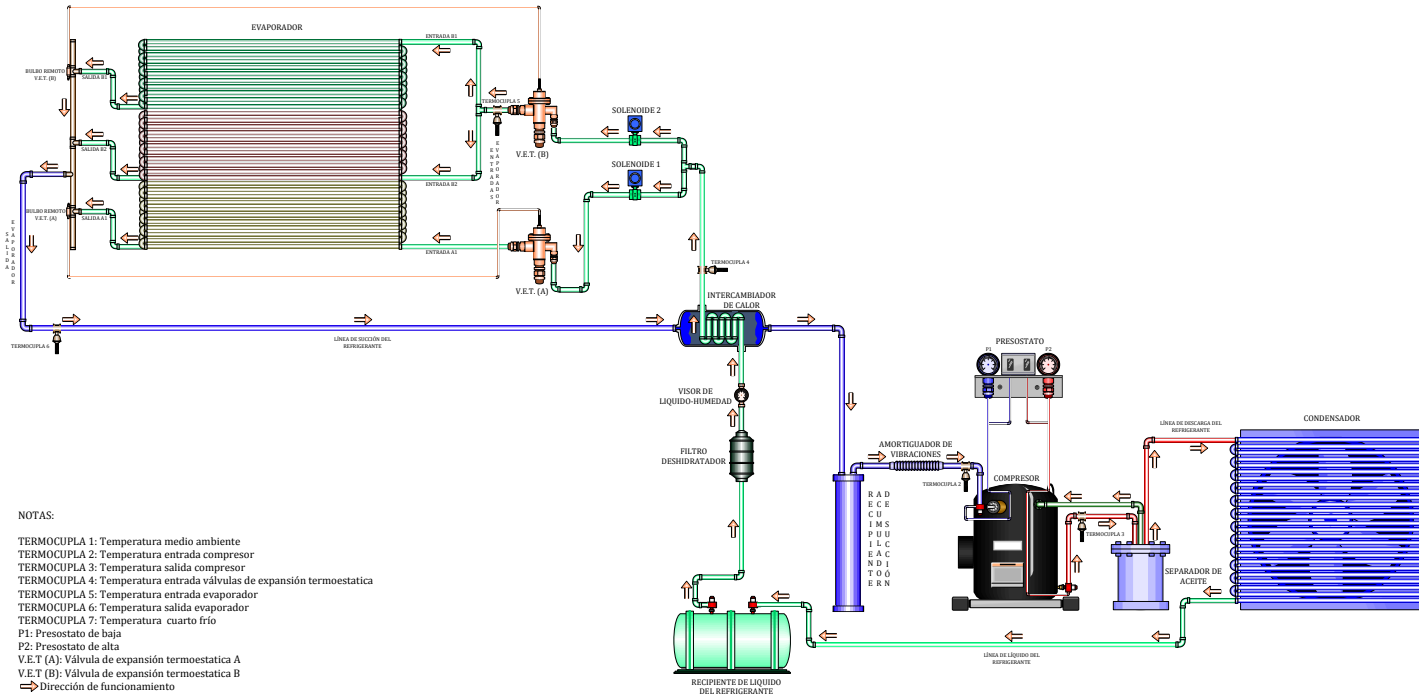
REALIZÓ:  
DANIEL EDUARDO BARAJAS MERCHÁN  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MARTHA LILIANA GÓMEZ SARMIENTO  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA MECÁNICA

FECHA:  
MAYO DE 2009  
PLANO No.:  
1/5





ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO CUARTO FRÍO DEL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN



NOTAS:  
 TERMOCUPLA 1: Temperatura medio ambiente  
 TERMOCUPLA 2: Temperatura entrada compresor  
 TERMOCUPLA 3: Temperatura salida compresor  
 TERMOCUPLA 4: Temperatura entrada válvulas de expansión termostatica  
 TERMOCUPLA 5: Temperatura entrada evaporador  
 TERMOCUPLA 6: Temperatura salida evaporador  
 TERMOCUPLA 7: Temperatura cuarto frío  
 P1: Presostato de baja  
 P2: Presostato de alta  
 V.E.T (A): Válvula de expansión termostatica A  
 V.E.T (B): Válvula de expansión termostatica B  
 → Dirección de funcionamiento

Universidad Industrial de Santander

DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN CARGA PARCIAL BAJO ESQUEMAS DE CONTROL CONTINUO Y CONTROL ON-OFF  
PROYECTO DE GRADO

CONTIENE:  
 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO CUARTO FRÍO

REVISO Y APROBO:  
 Ing. OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
DIRECTOR PROYECTO DE GRADO

REALIZO:  
 DANIEL E. BARAJAS MERCHÁN  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA MECÁNICA  
 MARTHA L. GÓMEZ SARMIENTO  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA MECÁNICA

OBSERVACIONES:

---

---

---

---

---

---

---

---

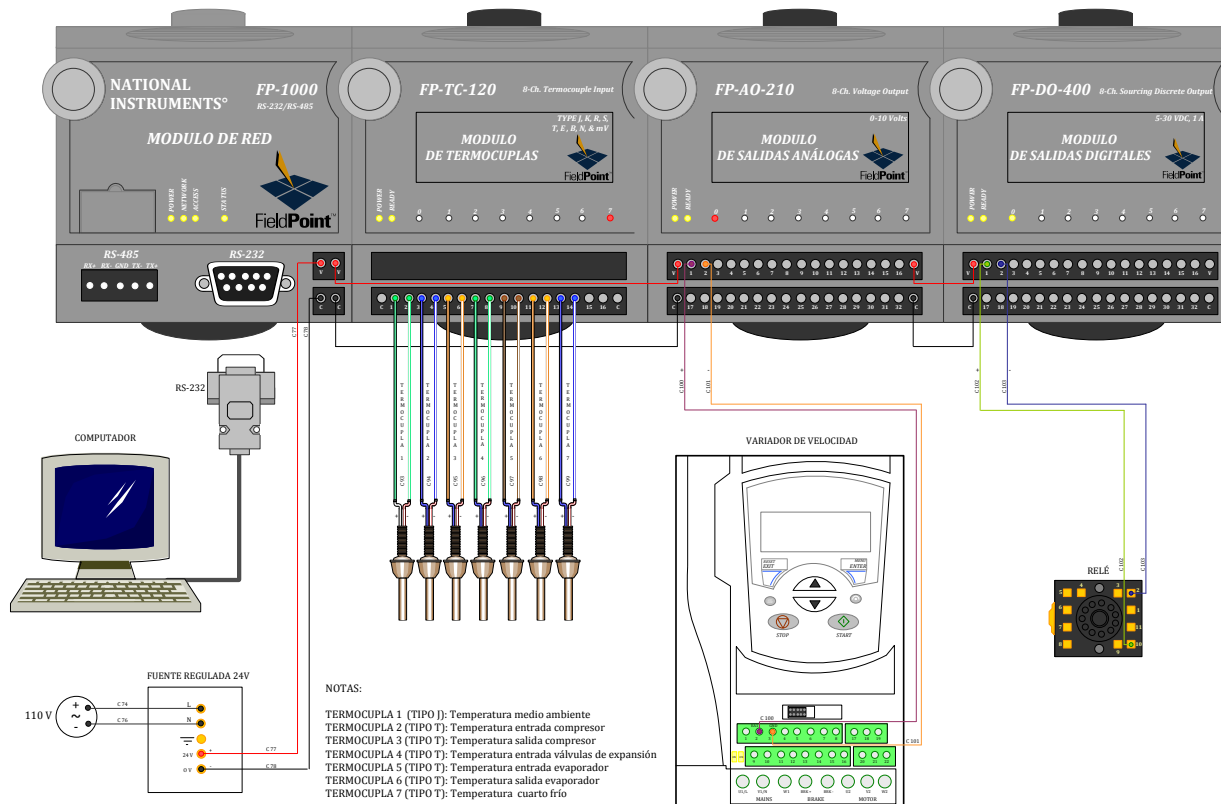
---

---

FECHA:  
 MAYO DE 2009

PLANO No.:  
 4/5

## MODULOS ADQUISICIÓN DE DATOS: FIELD POINT



DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN CARGA PARCIAL BAJO ESQUEMAS DE CONTROL CONTINUO Y CONTROL ON-OFF  
PROYECTO DE GRADO

CONTIENE:  
MODULOS ADQUISICIÓN DE DATOS: FIELD POINT

REVISÓ Y APROBO:  
Ing. OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
DIRECTOR PROYECTO DE GRADO

REALIZÓ:  
DANIEL E. BARRAJAS MERCHÁN  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MARTHA L. GÓMEZ SARMIENTO  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA MECÁNICA

OBSERVACIONES:

FECHA:  
MAYO DE 2009

PLANO No.:  
5/5