



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica Eléctrica

INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA SCADA EN EL CONTROL DE CUARTOS FRÍOS

Hugo Rolando Castellanos Álvarez

Asesorado por el Ing. Otto Fernando Andrino González

Guatemala, febrero de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA SCADA
EN EL CONTROL DE CUARTOS FRÍOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

HUGO ROLANDO CASTELLANOS ÁLVAREZ

ASESORADO POR EL ING. OTTO FERNANDO ANDRINO GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez
SECRETARIA	Inga. Mayra Grisela Corado García

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA SCADA EN EL CONTROL DE CUARTOS FRÍOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha septiembre 2009.

Hugo Rolando Castellanos Álvarez

Guatemala 18 de marzo 2011

Ing. Romeo López

Coordinador de Área

Escuela de Mecánica Eléctrica

Presente

Por este medio me dirijo a usted, para hacer de su conocimiento que he asesorado el proyecto de graduación titulado: **INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA SCADA EN EL CONTROL DE CUARTOS FRÍOS**, elaborado por el estudiante Hugo Rolando Castellanos Alvarez, quien se identifica con numero de carne: 2005-12037.

El presente trabajo de graduación, cumple con los requisitos establecidos en el reglamento de graduación profesional, por lo que emito la aprobación para que se prosiga con los trámites correspondientes.

Al agradecer su atención me es grato suscribirme,

Atentamente



Ing. Otto Andriano

Ingeniero Electricista *Otto F. Andriano G.*
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado Activo: 4038 *CÓLEGIADO # 4038*



Ref. EIME 51. 2011
Guatemala, 1 de AGOSTO 2011.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

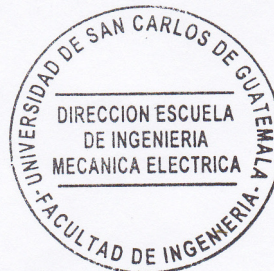
Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL E IMPLEMENTACIÓN DE
SISTEMA SCADA EN EL CONTROL DE CUARTOS FRÍOS, del
estudiante Hugo Rolando Castellanos Alvarez, que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Román Nefthalí López Orozco
Coordinador de Electrotécnica

RNLO/sro .

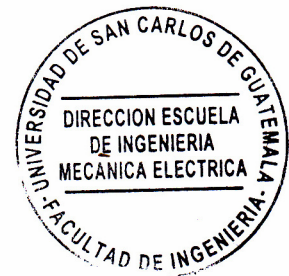




REF. EIME 70. 2011.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; HUGO ROLANDO CASTELLANOS ALVAREZ titulado: INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA SCADA EN EL CONTROL DE CUARTOS FRÍOS, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



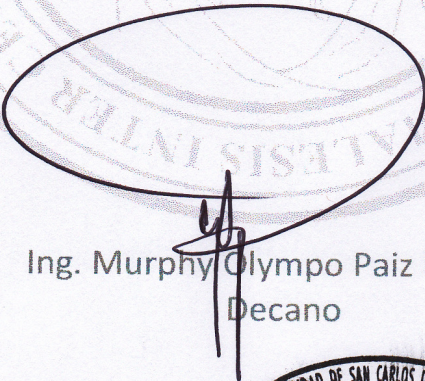
GUATEMALA, 26 DE OCTUBRE 2,011.



DTG. 073 .2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA SCADA EN EL CONTROL DE CUARTOS FRÍOS**, presentado por el estudiante universitario **Hugo Rolando Castellanos Álvarez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 17 de febrero de 2012.



/gdech

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	
1.1. Conceptos termodinámicos	1
1.1.1. Termodinámica	1
1.1.2. Definiciones básicas	1
1.1.3. Primera ley de la termodinámica.....	6
1.1.3.1. Energía.....	8
1.1.3.2. Calor.....	8
1.1.3.3. Entalpía	11
1.1.3.4. Trabajo	12
1.1.3.5. Balance de energía para sistemas cerrados ...	12
1.1.4. Segunda ley de la termodinámica	13
1.1.4.1. Procesos cuasi-estáticos	14
1.1.4.2. Máquinas térmicas	14
1.1.4.3. Enunciados de la segunda ley	14
1.1.4.4. Procesos reversibles e irreversibles.....	15
1.1.4.5. Principio de Carnot.....	16
1.1.4.6. El refrigerador y la bomba de calor de Carnot	16

1.1.4.7.	Entropía	18
1.1.5.	Sistemas de refrigeración	18
1.1.5.1.	Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	18
1.1.5.2.	Ciclo de refrigeración con gas (ciclo Brayton inverso)	21
1.1.6.	Mecanismos de transferencia de calor	23
1.1.6.1.	Conducción.....	24
1.1.6.2.	Convección	25
1.1.6.3.	Radiación.....	27
1.1.6.4.	Mecanismos simultáneos de transferencia de calor	27
1.1.6.5.	Intercambiadores de calor	29
1.1.6.6.	Refrigeración y refrigeradores.....	30
1.1.7.	Mezclas entre gases y líquidos.....	32
1.1.7.1.	Gas ideal.....	32
1.1.7.2.	Aire seco y aire atmosférico.....	32
1.1.7.3.	Humedad específica y relativa.....	33
1.1.7.4.	Temperatura de bulbo seco	33
1.1.7.5.	Temperatura de rocío	34
1.1.7.6.	Saturación adiabática y de bulbo húmedo.....	34
1.1.7.7.	Refrigerantes	35
1.2.	Conceptos eléctricos	43
1.2.1.	Sensores y elemento final de control.....	43
1.2.1.1.	Clasificación de sensores	44
1.2.1.2.	Transductores de temperatura.....	47
1.2.1.3.	Transductores de presión	51
1.2.1.4.	Actuadores.....	52

1.2.2.	Relés y contactores.....	52
1.2.2.1.	Relés	53
1.2.2.2.	Contactores	55
1.2.2.3.	Criterios para la selección de contactor	57
1.2.3.	Protecciones (interruptores termo magnéticos).....	57
1.2.3.1.	Relé térmico de sobrecarga	59
1.2.3.2.	Relé magnético de cortocircuito	60
1.2.3.3.	Fusibles	61
1.2.4.	Compresores (motor asíncrono)	62
1.2.4.1.	Motor asíncrono	62
1.2.4.2.	Características de motor	65
1.2.4.3.	Métodos de arranque para el motor asíncrono	66
1.2.4.4.	Compresor	70
1.2.5.	Variadores de frecuencia	71
1.2.6.	Factor de potencia	72
1.3.	Conceptos en teoría de control.....	74
1.3.1.	Lazo abierto	74
1.3.2.	Lazo cerrado	74
1.3.3.	Pre alimentación	75
1.3.4.	Control Todo o Nada.....	76
1.3.5.	Control PID.....	76
1.3.5.1.	Variable controlada	78
1.3.5.2.	<i>Setpoint</i>	78
1.3.5.3.	Error	78
1.3.5.4.	<i>Feedback</i>	78
1.3.5.5.	<i>PID output</i>	78
1.3.5.6.	Parámetros del control PID	79
1.3.5.7.	Ajuste de lazos.....	82

1.3.5.8.	Influencia de las constantes del control PID sobre la variable controlada	83
1.4.	Sistema SCADA	85
1.4.1.	Funciones del sistema SCADA.....	85
1.4.2.	Requisitos del sistema SCADA.....	86
1.4.3.	Unidades locales y remotas.....	86
1.4.4.	Componentes de <i>hardware</i>	87
1.4.5.	Componentes de <i>software</i>	87
1.4.6.	Interfaz humano-máquina (HMI)	88
2.	OPERACIÓN DE UN CUARTO FRÍO	
2.1.	Cuartos fríos.....	89
2.1.1.	Definición	90
2.1.2.	Elementos que lo componen	90
2.1.2.1.	Evaporador	92
2.1.2.2.	Condensador	93
2.1.2.3.	Compresor	93
2.1.2.4.	Válvula de expansión.....	95
2.1.3.	Ciclo de refrigeración.....	96
2.2.	Funcionamiento convencional	98
2.2.1.	Procedimientos de arranque y paro.....	98
2.2.2.	Funcionamiento de ventiladores	101
2.2.3.	Aparatos de control.....	102
2.2.3.1.	Aparatos de medición	103
2.2.3.2.	Controles básicos de operación (de ciclo)	105
2.2.3.3.	Sistema de seguridad	106
2.3.	Funcionamiento a implementar	108
2.3.1.	Procedimientos de arranque y paro.....	108

2.3.2.	Funcionamiento de ventiladores	109
2.3.3.	Instrumentación necesaria para el proceso.....	110
2.3.4.	Equipo y materiales a utilizar	110
2.3.5.	Sistemas de seguridad.....	115
2.3.6.	Correcciones del proceso.....	116
2.4.	Comparación técnica	118
2.4.1.	Ventajas	119
2.4.2.	Desventajas	120
3.	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD	
3.1.	Funcionamiento convencional.....	121
3.1.1.	Costos de equipo	121
3.1.2.	Costos de mantenimiento y montaje	122
3.1.2.1.	Cálculo de salario por operario	123
3.1.3.	Costos de operación	125
3.2.	Funcionamiento a implementar.....	126
3.2.1.	Costos de equipo	126
3.2.2.	Costos de mantenimiento y montaje	130
3.2.3.	Costos de operación	131
3.3.	Comparación económica	132
3.3.1.	Valor actual neto (VAN).....	133
3.3.2.	Valor actual uniforme equivalente (VAUE).....	134
3.3.3.	Tasa interna de retorno (TIR).....	134
3.3.4.	Beneficio - costo.....	134
4.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SCADA	
4.1.	Instalación de variador de frecuencia	137
4.1.1.	Instalación física.....	137
4.2.	Diseño del sistema de control para ahorro energético.....	138

4.2.1.	Desarrollo en <i>software</i>	140
4.2.1.1.	Ajuste lazo PID	147
4.2.2.	Límites de operación y seguridad	151
4.2.3.	Alcances del control.....	154
4.2.4.	OPC Server	155
4.2.4.1.	Funcionamiento	156
4.2.4.2.	Desarrollo de conexión de variador - CPU....	157
4.3.	Instrumentación virtual (LabVIEW).....	162
4.3.1.	Adquisición de datos en tiempo real	163
4.3.2.	Análisis y procesamiento de datos	164
4.3.3.	Módulo DSC	164
4.3.3.1.	Visualización.....	165
4.3.3.2.	Alarmas y eventos	165
4.3.3.3.	Historiadores.....	166
4.3.3.4.	Gráficas	167
4.3.3.5.	Seguridad (usuarios y contraseñas)	168
4.3.3.6.	Variables compartidas	171
4.3.4.	Diseño de sistema SCADA	172
4.3.4.1.	Pantalla inicial.....	173
4.3.4.2.	Pantalla de histogramas	173
4.3.4.3.	Pantalla de alarmas, eventos y reportes.....	175
4.3.4.4.	Pantalla de configuración.....	182
4.3.4.5.	Pantalla de supervisión.....	183
4.3.4.6.	Control remoto	185
4.3.5.	Alcances del sistema SCADA.....	187
4.4.	Pantalla táctil	188
4.4.1.	Instalación física	189
4.4.2.	Programación <i>software</i>	189
4.4.2.1.	Desarrollo de pantallas	190

4.4.2.2. Control por pantalla táctil.....	192
CONCLUSIONES	195
RECOMENDACIONES.....	199
BIBLIOGRAFÍA.....	201

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Principio de conservación de energía	7
2.	Bomba de calor de Carnot (motor).....	17
3.	Refrigerador	17
4.	Esquema de diagrama Ts	19
5.	Diagrama Ts ciclo Bryton inverso.....	21
6.	Ciclo Bryton inverso modificado	23
7.	Conducción	24
8.	Convección natural y forzada.....	25
9.	Diferencia entre convección y conducción	26
10.	Radiación	27
11.	Esquema de refrigerador	31
12.	Temperatura de rocío.....	34
13.	Temperatura de bulbo húmedo	35
14.	Estructura geométrica de un transductor	45
15.	Termopar	48
16.	Coeficiente <i>NTC</i> y <i>PTC</i>	50
17.	Transductor de presión de membrana	52
18.	Relé.....	54
19.	Contactador	56
20.	Interruptor termomagnético, curva de respuesta	59
21.	Relé térmico, curva de respuesta.....	60
22.	Relé magnético, curva de respuesta.....	60
23.	Fusibles y curvas de respuesta.....	61

24.	Estator	63
25.	Estructura del devanado jaula de ardilla.....	64
26.	Rotor bobinado o de anillos	64
27.	Diagrama de variador de frecuencia.....	72
28.	Lazo cerrado.....	75
29.	Control <i>feedforward</i>	76
30.	Control PID	77
31.	Control proporcional	79
32.	Control integral	80
33.	Control derivativo.....	81
34.	Efecto de las constantes en el control PID	84
35.	Elementos de un cuarto frío.....	91
36.	Arranque simple de compresor.....	99
37.	Arranque controlado por termostato	100
38.	Instalación eléctrica convencional	102
39.	Diagrama de flujo de caja	133
40.	Diagrama eléctrico.....	137
41.	Diagrama de control y diagrama de bloques	139
42.	Declaración de entradas analógicas.....	141
43.	Declaración de entradas y salidas digitales.....	143
44.	Rampa aceleración y desaceleración	146
45.	Ajuste de lazos PID	147
46.	Habilitación PID	148
47.	<i>Setpoint</i> y <i>feedback</i>	149
48.	Adición de variables a monitorear (<i>OPC Server</i>).....	157
49.	Ventana de edición de parámetros.....	159
50.	Guardar datos.....	160
51.	Ventana <i>OPC Server</i>	161
52.	Configuración de comunicación <i>OPC Server</i>	161

53.	Historiadores	166
54.	Creación de usuarios	169
55.	Pantalla de acceso a usuarios	170
56.	Variable compartida	172
57.	Pantalla y programación de histograma	173
58.	Habilitación de alarmas y eventos para una variable	175
59.	Pantalla de alarmas	176
60.	Pantalla de eventos.....	177
61.	Código para generar e imprimir reportes	179
62.	Pantalla de configuración y ajustes.....	182
63.	Pantalla principal.....	184
64.	Ventana de herramientas de publicación <i>Web</i>	186
65.	Control remoto vía <i>Web</i>	187
66.	Configuración de comunicación	190
67.	Declaración de variables.....	191
68.	Interfaz de usuario para diseño de pantallas	192
69.	Control y supervisión a través de pantalla táctil	193

TABLAS

I.	Comparación del efecto de refrigeración.....	38
II.	Propiedades comparativas de diferentes refrigerantes	38
III.	Características de distintos tipos de termopares.....	49
IV.	Comparación de arranques	70
V.	Efecto del incremento de los parámetros del control PID.....	84
VI.	Consumo de kW/h. comparación entre sistemas	118
VII.	Costo de materiales eléctricos	122
VIII.	Costo mensual de energía eléctrica en instalaciones refrigeradas	125
IX.	Costo de materiales eléctricos para el sistema propuesto	126

X.	Cantidad de horas por servicio	130
XI.	Comparación entre costos de sistemas propuestos	132
XII.	Comparación económica	135

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Hp	Caballos de fuerza
Q	Calor
C_p	Calor específico a presión constante
C_v	Calor específico a volumen constante
cm.	Centímetro
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
ρ	Densidad
U	Energía interna
H	Entalpía
S	Entropía
Cos Φ	Factor de potencia
frig/hora	Frigorías por hora
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
K	Grados Kelvin
°R	Grados Rankine
gr	Gramo
gr/cm³	Gramos por centímetro cúbico
Hz	Hertz, ciclos por minuto
φ	Humedad relativa
RH	Humedad relativa
ω	Humedad específica

J	<i>Joule</i>
J/K	<i>Joules</i> por Kelvin
kW/h	Kilovatio por hora
kJ/kg°C	Kilo <i>Joule</i> por kilogramo Celsius
kJ/kgK	Kilo <i>Joule</i> por kilogramo Kelvin
kJ/min	Kilo Joule por minuto
lb_m	Libras masa
lb_m/ft³	Libras masa por pie cúbico
Psi	Libras sobre pulgada cuadrada
m	Masa
mA	Miliamperios
m³/h	Metro cúbico por hora
Ω	Ohmio
Ω/°C	Ohmio sobre grado Celsius
ft	Pies (<i>feets</i>)
%	Porcentaje
P	Presión
RPM	Revoluciones por minuto
T	Temperatura
t	Tiempo
W	Trabajo
Btu	Unidad térmica británica (<i>British thermal unit</i>)
Btu/min	Unidad termica británica por minuto
Vac	Voltios en corriente alterna
Vdc	Voltios en corriente directa
V	Volumen
v	Volumen específico

GLOSARIO

Adiabático	Sistema que no intercambia calor con su entorno.
Automatización	Uso de sistemas o elementos computarizados para controlar maquinarias y/o procesos industriales, sustituyendo a operadores humanos.
Azeótropo	Mezcla líquida de dos o más componentes que posee un único punto de ebullición constante y fijo, y que al pasar al estado vapor (gaseoso) se comporta como un compuesto puro, o sea como si fuese un solo componente.
Bimetal	Objeto que se compone de dos o más metales ensamblados juntos. En lugar de ser una mezcla de dos o más metales, como en el caso de una aleación, los objetos bimetálicos consisten en capas de diversos metales.
Bit	Unidad mínima de información empleada en informática, en cualquier dispositivo digital, o en la teoría de la información. Con él, se puede representar dos valores, cualquiera, como verdadero o falso, abierto o cerrado, etc. Basta con asignar uno de esos valores al estado de apagado (0), y el otro al estado de encendido (1).

Código de programación Conjunto de bloques o líneas de texto que son las instrucciones que debe seguir la computadora para ejecutar un programa. Por tanto, en el código de un programa está descrito por completo su funcionamiento.

Comisionamiento Proceso sistemático para garantizar que los sistemas que conforman una nueva construcción o proyecto, interactúen entre sí, de acuerdo con la documentación originada en los procesos de planeación, diseño y construcción, y las necesidades operativas de los dueños del proyecto.

Compresor Dispositivo que aumenta la presión de un fluido. El trabajo es suministrado a éste por una fuente externa mediante un eje rotatorio. Por consiguiente, el término de trabajo para un compresor es negativo puesto que el trabajo se efectúa sobre el fluido.

Compresor centrífugo El compresor centrífugo, es un tipo especial de turbo maquinaria que aumenta la presión del fluido a base de comunicarle energía cinética (velocidad con el rotor). Esta energía cinética se transforma en un incremento de presión estática cuando el fluido pasa por un difusor. También es llamado compresor radial.

Compresor recíprocante	También llamado de tipo recíproco o alternativo, es un tipo de compresor que logra comprimir un volumen de gas en un cilindro cerrado, volumen que posteriormente es reducido mediante una acción de desplazamiento mecánico del pistón dentro del cilindro.
Conmutar	Cambiar o sustituir estados en un dispositivo.
Control	Disciplina de la ingeniería que se dedica a diseñar sistemas en los cuales se pueda predecir su comportamiento y pueda ser manipulado a conveniencia.
Curvas Ts	Relacionan las variaciones temperatura, entropía. Son muy útiles para comprender los intercambios de calor y procesos con irreversibilidades.
Exergía	Magnitud termodinámica que indica el máximo trabajo teórico que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno. Informa de la utilidad potencial del sistema como fuente de trabajo.
Frigorías	Unidad de energía informal para medir la absorción de energía térmica. Equivale a una kilocaloría negativa.

Instrumentación	Es la parte de la electrónica, principalmente analógica, que se encarga del diseño y manejo de los aparatos electrónicos y eléctricos, sobre todo para su uso en mediciones.
Interfaz	Conjunto de métodos para lograr interactividad entre un usuario y una computadora. Puede ser <i>hardware</i> , por ejemplo, monitor, teclado y <i>mouse</i> , son interfaces entre el usuario y el ordenador.
Isoentrópico	Es el que en la entropía del fluido que forma el sistema, permanece constante.
Isotrópico	Característica de los cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección.
Monitorear	Supervisar el comportamiento de un elemento o sistema.
Proceso	Conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de las materias primas, para la obtención de un determinado producto.
Refrigeración	Proceso de reducción y mantenimiento de la temperatura de un objeto o espacio, a un valor menor a la del medio ambiente.

Sensor NTC

Sensor de coeficiente negativo de temperatura (*Negative Temperature Coefficient*), son resistencias cuyo coeficiente de temperatura es negativo, es decir, que su valor óhmico disminuye al aumentar la temperatura.

Sensor PTC

Sensor de coeficiente positivo de temperatura (*Positive Temperature Coefficient*), son resistencias cuyo coeficiente de temperatura es positivo, es decir que su valor óhmico aumenta al subir la temperatura.

Sistema

Conjunto de elementos o funciones dinámicamente relacionados formando una actividad para alcanzar un objetivo operando sobre datos, energía o materia para proveer información o realizar un proceso.

Software

Conjunto de los programas de cómputo, procedimientos, reglas, documentación y datos asociados que forman parte de las operaciones de un sistema de computación.

RESUMEN

La termodinámica es la ciencia de las transformaciones de la energía en la que interviene el calor, el trabajo mecánico y otros aspectos de la energía, así como las relaciones entre las propiedades físicas de las sustancias afectadas por dichas transformaciones.

Estas propiedades físicas determinan el comportamiento de un sistema, siendo las más relevantes, la presión, la temperatura y el volumen. Conociendo estas propiedades se puede determinar el comportamiento de cualquier proceso, como dicta el postulado de estado de las leyes termodinámicas.

La primer ley de la termodinámica, la cual dice que la energía no se crea ni destruye sólo se transforma, es una medida de la cantidad de energía que se maneja en un sistema, mientras que la segunda ley de la termodinámica establece la calidad de energía, determinando de esta manera cuánta energía se transforma en trabajo y cuánta se pierde en calor. Ese calor perdido se dispersa a otros sistemas aledaños por alguno de los mecanismos de transferencia de calor existentes, pudiendo ser por conducción, convección o radiación. Así, sabiendo cómo y cuánta energía pierde, se puede estimar la eficiencia de un procedimiento.

El sensor es un dispositivo que convierte una magnitud física en una señal eléctrica, existiendo variedad de sensores dependiendo del parámetro físico a medir, por ejemplo de temperatura, presión, nivel, etc. El actuador es un dispositivo que realiza una función final dependiendo de lo medido por el sensor y las decisiones tomadas por el sistema de control.

Un variador de frecuencia, además de funcionar como actuador, contiene además en su interior la programación necesaria para establecer control a un proceso. Básicamente su operación se basa en la rectificación de la onda sinodal de alimentación comercial AC, transformándola en DC, para luego reconstruir la onda AC de frecuencia variable por el usuario con base en la modulación de ancho de pulso, esto se logra con la utilización de dispositivos electrónicos en su interior y *software* de programación que gobierne sus operaciones.

Un cuarto frío opera con base en la expansión y compresión de un líquido refrigerante que lo hace fluir a través de las tuberías del sistema, durante el proceso se produce una transferencia de calor, la cual absorbe el calor del ambiente reduciendo así la temperatura del mismo. El compresor es el responsable de succionar y expulsar el refrigerante en las tuberías, en tanto el compresor funcione, el sistema es cíclico.

OBJETIVOS

General

Proponer la implementación de un sistema eficiente de control y adquisición de datos para las operaciones de un cuarto frío que tenga como prioridad el ahorro energético.

Específicos

1. Aplicar los conceptos termodinámicos y eléctricos que intervienen en el funcionamiento de cuartos fríos, así como la teoría de control de los mismos.
2. Analizar los métodos de operación del control convencional de un cuarto frío.
3. Realizar un estudio comparativo con base en los datos más relevantes en cuestión de costos de operación de un cuarto frío convencional, contra el control propuesto.
4. Diseñar un sistema SCADA para el control de cuartos fríos, utilizando elementos de *software*.

INTRODUCCIÓN

Una de las ramas más importantes de la mecánica es la termodinámica, pues en ésta se basan todos los fenómenos que relacionan los cambios de energía que se dan alrededor, como el estudio del calor y todas aplicaciones de ingeniería que se llevan a cabo a través de él.

La termodinámica juega un papel de suma importancia en la vida de todo ser humano, pues los cambios de calor que sufren todos los cuerpos se han contemplado en las leyes de la termodinámica, sin necesidad que el cuerpo en cuestión lo sepa. En otras palabras el cambio de calor para una persona repercutirá de manera directa en su manera de vivir y de estar en equilibrio con el medio ambiente, o dicho de otra manera, el modo de vida de la persona será más o menos placentero. Por ejemplo, si la persona siente frío usará ropa más abrigada que si sintiera calor.

A lo largo del tiempo el ser humano siempre ha buscado la comodidad, así como mejorar su forma de vida, ya sea manteniendo siempre un clima agradable, buscando nuevas maneras de relacionarse o cualquier tipo de actividad que la haga más satisfactoria, sin olvidar cubrir con las necesidades básicas. La alimentación es primordial para todo ser humano y aunque la naturaleza es la que provee el alimento, a medida que el tiempo avanza surge la necesidad de poder almacenar, transportar y preparar sus componentes.

Analizando más a fondo el tema del almacenamiento del alimento, queda claro que todos los alimentos cosechados, como aquellos que son extraídos de animales, incluyendo su carne, y cualquier otro tipo de alimento o bebida fabricada, son productos perecederos. Ante esto se plantea la situación de cómo mantener por más tiempo el buen estado de los alimentos. Surge como opción la conservación de estos productos a bajas temperaturas, para así poder lograr preservar por mucho más tiempo sus características similares a las de su estado natural.

La conservación de alimentos a bajas temperaturas, se ha hecho desde ya varias décadas, por medio de sistemas de refrigeración, los cuáles, con base en los principios termodinámicos y con ayuda de principios y equipos eléctricos, han logrado convertir pequeños cuartos en secciones con temperaturas controladas por medio de compresores de aire y líquidos refrigerantes capaces de bajar la temperatura de cualquier cuerpo, de allí su nombre cuarto frío.

Pero el concepto de cuarto frío se ha expandido a la forma cómo éstos han evolucionado, ya no es más un simple cuarto en el cual la temperatura es muy baja, sino que ahora es controlable y ésta es variable dependiendo del producto almacenado, además, el tamaño ya no es una limitación, constantemente se ve la necesidad de ampliar sus dimensiones sin que esto perjudique su rendimiento. Por último, con las nuevas tecnologías, los equipos cada vez más eficientes y superiores a sus antecesores, se logra que los cuartos fríos tengan una enorme aplicación en la industria alimenticia y que su uso en restaurantes, distribuidoras de alimentos, supermercados, entre otros, sea de vital importancia.

Pero ante la constante evolución que han tenido los cuartos fríos queda más por hacer, ya no sólo es necesario que puedan conservar alimentos a bajas temperaturas, sinó que es necesario que lo hagan de la manera más eficiente energéticamente hablando. Con el paso del tiempo y el crecimiento poblacional que se está dando en el planeta, la conservación de la energía es algo de interés global. Pero sin entrar en intereses sociales, humanitarios o ecológicos; a nivel industrial un ahorro de energía representa directamente un ahorro económico, esto interesa a más de un empresario, significando un aumento de sus utilidades lo cual resulta beneficioso.

Los cuartos fríos desde un principio han sido monitoreados por seres humanos, operarios capacitados para su control, los cuales desempeñan la labor de supervisar las condiciones en las que trabajan y ejercer control de sus funciones para cambiar parámetros establecidos con el fin de mejorar su funcionamiento. Está claro que ante el sistema convencional de supervisión por un operario a un sistema más hábil en la realización de las mismas tareas durante todo el tiempo de uso, reduciendo la cantidad de errores y con la capacidad de almacenar toda la información, datos, alarmas o eventos que se hayan suscitado en la operación del cuarto frío, presentando los resultados de una manera amigable y clara, con el valor agregado de ahorro de energía, sabremos con certeza que es necesario un cambio y pasar de lo convencional a una clara solución de ingeniería: la automatización.

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1. Conceptos termodinámicos

Es la ciencia que trata de las transformaciones de la energía en la que intervienen el calor, el trabajo mecánico y otros aspectos de la energía, así como las relaciones entre las propiedades físicas de las sustancias afectadas por dichas transformaciones.

1.1.1. Termodinámica

La termodinámica técnica ha incluido tradicionalmente el estudio de áreas tan diversas como dispositivos generadores de energía estacionarios y móviles, refrigeración y acondicionamiento de aire, expansores y compresores de fluidos, motores de combustión y procesamientos químicos, como el que se utiliza en las refinerías de petróleo.

Hay ciertos principios fundamentales de la naturaleza, llamados leyes termodinámicas, que rigen nuestra existencia aquí en la tierra, varios de los cuales son básicos para el estudio de la refrigeración.

1.1.2. Definiciones básicas

Para entender las leyes de la termodinámica, es necesario conocer los siguientes términos: densidad, densidad relativa, volumen, volumen específico, presión, temperatura y saturación.

- Densidad de una sustancia: es la masa por unidad de volumen y se expresa normalmente en gr/cm^3 , o lb_m/ft^3 .

$$\rho = m/V$$

Donde:

ρ = densidad

m = masa

V = volumen

Puesto que, la densidad está directamente relacionada al volumen específico, la densidad de cualquier fluido puede variar con los cambios de presión y de temperatura; sin embargo, se mantiene siendo imperceptible a la vista.

- Densidad relativa de una sustancia: es el cociente de su densidad entre la densidad del agua a una temperatura específica.

$$\rho_{es} = \rho / \rho_{H_2O}$$

Donde:

ρ_{es} = densidad específica

ρ = densidad

ρ_{H_2O} = densidad del agua, $1.00 \text{ gr}/\text{cm}^3$ o $62.3 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$

- Volumen: es una magnitud definida como el espacio ocupado por un cuerpo. La unidad de medida de volumen en el sistema internacional de unidades es el metro cúbico y en el sistema inglés es el pie cúbico, aunque generalmente también se acepta el litro, que se utiliza comúnmente en la vida práctica.

$$V = m / \rho$$

Donde:

V = volumen

m = masa

ρ = densidad

- Volumen específico: es el volumen por unidad de masa de una sustancia; corresponde, por lo tanto, al recíproco de la densidad:

$$v = V / m = 1 / \rho$$

Donde:

v = volumen específico

V = volumen

m = masa

ρ = densidad

- Presión: es la fuerza normal por unidad de área que actúa sobre las fronteras del sistema. Esta puede estar dada en pascales (sistema internacional), bares (sistema inglés).

Para medir la presión se utiliza un instrumento llamado manómetro, que da una lectura de la diferencia de presión en términos de altura de columna de agua, esta medida puede ser convertida a cualquier otro sistema de dimensionales.

En cuestión de presión se encuentran diferentes tipos:

- Atmosférica alrededor de la tierra: está compuesta de gases, como el oxígeno y el nitrógeno, se extiende muchos kilómetros sobre la superficie. El peso de la atmósfera sobre la tierra crea la presión atmosférica.

Ésta varía de un punto a otro del planeta y según las condiciones meteorológicas. Se ha convenido en tomar como condición normal a la presión de 101,3 kilo Pascales a 20 °C.

- Absoluta: es la presión real en un punto determinado del sistema, debido a que se mide en forma relativa a una presión absoluta de cero. Por lo tanto en el aire alrededor, la presión absoluta y la atmosférica son iguales.
- Manométrica: es la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica.

$$P_{\text{man}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{man}}$$

Donde:

P_{man} = presión manométrica

P_{abs} = presión absoluta

P_{atm} = presión atmosférica

La lectura de un medidor de presión manométrica puede ser positiva o negativa. A una presión manométrica negativa (que se presenta cuando la presión atmosférica es mayor que la presión absoluta), se le conoce como vacío.

- Temperatura: es la escala utilizada para medir la intensidad del calor y es el indicador que determina en qué dirección se moverá la energía en forma de calor. También puede definirse como el grado de calor sensible que tiene un cuerpo en comparación a otro. El aparato para medirla es el termómetro. En el sistema internacional la temperatura se mide en grados Celsius, en el sistema inglés se mide en grados Fahrenheit. Ambas escalas tienen dos puntos básicos en común: la congelación y la ebullición del agua a nivel del mar.

Al nivel del mar el agua se congela a 0°C o a 32°F y hierve a 100°C o a 212°F . En la escala Fahrenheit, la diferencia de temperatura entre estos dos puntos está dividida en 180 incrementos de igual magnitud, mientras en la escala Celsius, la diferencia de temperatura está dividida en 100 incrementos iguales. La relación existente entre las escalas Fahrenheit y Celsius se establece por las siguientes fórmulas:

$$^{\circ}\text{C} = 5/9 * (^{\circ}\text{F} - 32^{\circ})$$

$$^{\circ}\text{F} = 9/5 * ^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}$$

Donde:

$^{\circ}\text{C}$ = grados Celsius

$^{\circ}\text{F}$ = grados Fahrenheit

- **Equilibrio térmico:** es cuando ocurre que dos sistemas, que se encuentran aislados de los alrededores locales, no experimentan un cambio de estado cuando entran en contacto a través de una frontera rígida común. En la práctica, el tercer sistema descrito en la ley cero es un termómetro.

Se ha demostrado que cuando dos sistemas se encuentran, cada uno de ellos en equilibrio térmico con un tercer sistema, también estarán en equilibrio térmico entre sí. La anterior afirmación es un postulado termodinámico conocido como ley cero.

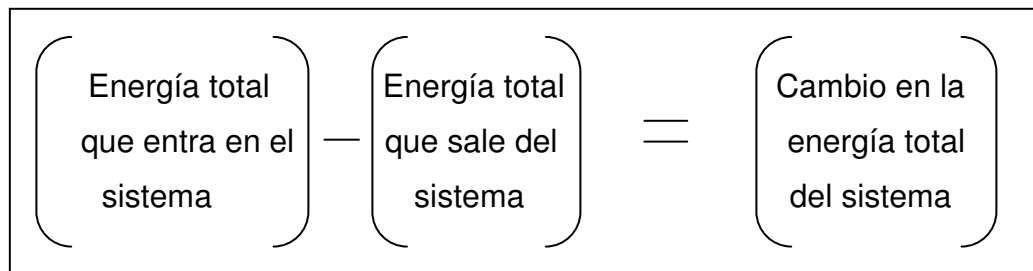
- **Saturación:** es la condición de temperatura y presión en la cual el líquido y el vapor pueden existir simultáneamente. Un líquido o vapor está saturado cuando está en su punto de ebullición. A presiones más altas la temperatura de saturación aumenta, y disminuye a temperaturas más bajas.

1.1.3. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica, también conocida como el principio de conservación de la energía, afirma que la energía no puede crearse ni destruirse; sólo puede cambiar de forma.

El principio de conservación de la energía (o balance de la energía), para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como sigue: el cambio (aumento o disminución) neto en la energía total del sistema durante un proceso, es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante ese proceso, ver figura 1.

Figura 1. **Principio de conservación de energía**



Fuente: ÇENGEL, Yunus A. *Introducción a la termodinámica*. p. 199.

Dado que la energía se puede transferir a un sistema, o hacia fuera de éste, por medio de calor, trabajo y flujo de masa, y que la energía total de un sistema simple compresible consta de las energías interna, cinética y potencial, el balance de energía para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como:

$$Q + W = \Delta E$$

Donde:

Q = energía en forma de calor

W = trabajo

ΔE = cambio de energía

1.1.3.1. Energía

Ésta puede existir en numerosas formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química, nuclear, entre otras, y su suma constituye la energía total E (e en términos de unidad de masa) de un sistema. Las formas de energía relacionadas con la estructura molecular de un sistema, es decir, la suma de todas las formas microscópicas de energía se llama energía interna de un sistema y se denota por U (u en términos de unidad de masa).

La unidad internacional de energía es el *joule* (J) el *kilojoule* ($\text{kJ} = 1000 \text{ J}$). En el sistema inglés, la unidad de energía es la unidad térmica británica (Btu, *British thermal unit*), que se define como la energía necesaria para elevar en 1°F la temperatura de 1 lb_m de agua a 60°F .

1.1.3.2. Calor

El calor Q (q en términos de unidad de masa) es una forma de energía, creada principalmente por la transformación de otros tipos de energía en energía en forma de calor; por ejemplo, la energía mecánica que opera una rueda causa fricción y crea calor.

El calor es frecuentemente definido como energía en tránsito porque nunca se mantiene estática, ya que siempre se está transmitiendo de los cuerpos cálidos a los cuerpos fríos.

La mayor parte del calor en la tierra se deriva de las radiaciones del sol. Una cuchara sumergida en agua helada pierde su calor y se enfría; una cuchara sumergida en café caliente absorbe el calor del café y se calienta. Sin embargo, las palabras más caliente y más frío son sólo términos comparativos. La medida de la temperatura no tiene ninguna relación con la cantidad de calor. Una llama de fósforo puede tener la misma temperatura que una hoguera, pero obviamente la cantidad de calor que despiden es totalmente diferente. La unidad básica para medir el calor es la misma utilizada para la medición de energía.

Hay distintas formas de calor, las cuales se diferencian por los cambios que ocasionan a los cuerpos o sustancias que afectan:

- Calor específico: se define como la energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado. En general, ésta depende de cómo se ejecuta el proceso. En termodinámica interesan dos clases de calores específicos:
 - Calor específico a volumen constante C_v , energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado mientras el volumen se mantiene constante.
 - Calor específico a presión constante C_p , energía requerida para hacer lo mismo, sólo que a presión constante.

El C_p es mayor que el C_v porque, a presión constante, el sistema se le permite expandirse y la energía necesaria para este trabajo de expansión debe suministrarse al sistema. La unidad para los calores específicos es el $\text{kJ/Kg}^\circ\text{C}$ o kJ/KgK . Estas dos unidades son idénticas, ya que un cambio de 1°C equivale al cambio de 1K .

- Calor sensible: es el calor que provoca un cambio de temperatura en una sustancia. En otras palabras, es el calor que puede percibirse por medio de los sentidos. Por ejemplo, cuando la temperatura del agua se eleva de 0°C a 100°C, hay también un aumento de calor sensible.

- Calor latente: es la energía interna asociada con la fase de un sistema. Es cuando una sustancia absorbe una cantidad Q de calor y ésta cambia de estado, del mismo modo a la misma masa se le deberá sustraer una cantidad Q de calor para que regrese a su estado original.
 - Calor latente de fusión: el cambio de una sustancia de sólida a líquida o de líquida a sólida requiere calor latente de fusión. Éste también puede llamarse calor latente de licuefacción o calor latente de congelación. En congelación de productos alimenticios, únicamente se considera el calor latente del porcentaje de agua que éstos contienen; por lo tanto, el calor latente se conocerá, determinando el porcentaje de agua que existe en dichos productos.

 - Calor latente de evaporación: es el requerido para cambiar una sustancia de líquido a vapor y de vapor a líquido. Puesto que la ebullición es sólo un proceso acelerado de evaporación, éste también puede llamarse calor latente de ebullición, o para el proceso contrario, calor latente de condensación.

Debido a la gran cantidad de calor latente que interviene en la evaporación y en la condensación, la transmisión de calor puede ser muy eficiente mediante este proceso. Los mismos cambios de estado que afectan al agua se aplican a cualquier líquido, aunque a diferentes presiones y temperaturas.

La absorción de calor para cambiar un líquido a vapor y la substracción de este calor para condensar nuevamente el vapor, es la clave para todo proceso de la refrigeración mecánica y la transmisión del calor latente requerido, es el instrumento básico de la refrigeración.

- Calor latente de sublimación: este proceso es el cambio directo de un sólido a un vapor sin pasar por el estado líquido, que puede ocurrir en algunas sustancias. El ejemplo más común es el uso de hielo seco, o sea bióxido de carbono para enfriar. El calor latente de sublimación es igual a la suma del calor latente de fusión y el calor latente de evaporación.

1.1.3.3. Entalpía

También llamada contenido de calor, es una magnitud termodinámica simbolizada con la letra H, la variación de entalpía expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que tal sistema puede intercambiar con su entorno (propiedad que tiene una sustancia para ganar o perder calor), y se define mediante la relación:

$$H = U + PV$$

Donde:

H = entalpía

U = energía interna

P = presión

V = volumen

1.1.3.4. Trabajo

El concepto de trabajo W normalmente se introduce en el estudio de la mecánica. Se define el trabajo mecánico como el producto de una fuerza F y un desplazamiento s de la fuerza, cuando se miden ambos en la misma dirección.

En termodinámica resulta útil definir el trabajo en un sentido más amplio de sistemas y procesos, en lugar de utilizar el concepto de trabajo mecánico. En termodinámica el trabajo es una interacción entre un sistema y sus alrededores, y lo desempeña el sistema, si el único efecto externo a las fronteras del sistema podría consistir de la elevación de un peso.

Existe un tipo importante de proceso (en termodinámica), que se conoce como proceso adiabático. Se define éste como cualquier proceso en el cual intervienen, exclusivamente, interacciones de trabajo.

1.1.3.5. Balance de energía para sistemas cerrados

Un sistema cerrado consta de una masa fija. La energía total E para la mayor parte de los sistemas que se encuentran en la práctica consiste en la energía interna U . Éste es en especial el caso para los sistemas estacionarios, ya que no comprenden cambios en la velocidad o elevación durante el proceso. En este caso, la relación del balance de energía se reduce a:

$$E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} = \Delta U = mC_v\Delta T$$

Donde:

E_{ent} = energía entrante

E_{sal} = energía saliente

ΔU = cambio de la energía interna

m = masa

C_v = calor específico a volumen constante

ΔT = cambio de temperatura

1.1.4. Segunda ley de la termodinámica

El desarrollo de la segunda ley de la termodinámica se apoya fuertemente en el concepto de los estados de equilibrio. Es equilibrio de un sistema se caracteriza o define así:

- Un sistema se halla en equilibrio si un cambio adicional de estado no puede ocurrir, a menos que el sistema se someta a interacciones con sus alrededores.
- Un cambio finito del estado de un sistema en equilibrio necesita que, en el estado de sus alrededores haya un cambio finito y permanente.

El enunciado siguiente es una de las normas de la segunda ley de la termodinámica: “Todo sistema que tenga ciertas restricciones especificadas y que tenga un límite superior para su volumen, partiendo de cualquier estado inicial, puede alcanzar un estado de equilibrio estable, sin que haya un efecto neto sobre sus alrededores”.¹

¹ WARK, Kenneth Jr. *Termodinámica*. p. 270.

1.1.4.1. Procesos cuasi-estáticos

Este proceso es en el que el sistema se encuentra en todo instante en un estado infinitesimalmente próximo al estado de equilibrio termodinámico. Es decir, es tan lento el proceso, que podría parecer estático.

1.1.4.2. Máquinas térmicas

Una máquina térmica es un sistema cerrado que opera cíclicamente y produce trabajo intercambiando calor a través de sus fronteras. La restricción de funcionamiento continuo o cíclico implica que la sustancia dentro de la máquina regrese a su estado inicial a intervalos regulares.

1.1.4.3. Enunciados de la segunda ley

Los enunciados de la segunda ley son el resultado de la observación generalizada de la naturaleza. Es por eso que se habla de principios. Un principio es algo observable y definible axiomáticamente, pero cuya índole es tan básica que no puede deducirse de elementos teóricos más simples.

- Enunciado de Planck – Kelvin: es imposible construir una máquina térmica cuyo único efecto sea el intercambio de calor con una sola fuente, inicialmente en equilibrio y la producción de trabajo neto.

Dicho con otras palabras, la eficiencia de cualquier máquina térmica es siempre menor de 100%. Así, toda máquina térmica debe expulsar cierta parte del calor que se suministra a otro sistema que se halle a una temperatura inferior.

- Enunciado de Clausius: no es posible la operación de un proceso que, funcionando cíclicamente, no haga otra cosa que tomar calor de una fuente fría y transferirlo íntegramente a una fuente cálida.

En otras palabras el calor siempre viajará del cuerpo más cálido al cuerpo más frío. Por ejemplo, una taza de café caliente al exponerla al ambiente se enfría, pero una taza de café frío al exponerla al ambiente no se calienta.

1.1.4.4. Procesos reversibles e irreversibles

Un proceso que comience en un estado inicial de equilibrio se llama reversible (o totalmente reversible), si en cualquier instante, durante el proceso, tanto el sistema como el ambiente con el que interactúa pueden regresar a sus estados iniciales. Como consecuencia, la naturaleza de un proceso reversible es tal que todas las interacciones de calor y de trabajo que ocurren durante el proceso original (proceso de ida), son iguales en magnitud a las que ocurren durante el proceso inverso, pero con signo opuesto. De esta manera, no se deja una historia neta en los alrededores cuando el sistema recobre su estado inicial.

El proceso reversible es una idealización. Es un concepto al que los equipos reales pueden, en ocasiones, acercarse mucho, pero nunca alcanzar. Existen dos razones fundamentales por las cuales un proceso real nunca puede ser totalmente reversible. En primer lugar, se necesita la ausencia de efectos disipativos (fricción, rozamiento, etc.), y en segundo lugar la exigencia de que un proceso sea cuasi estático, para que sea reversible.

En un proceso irreversible, ya sea el sistema o sus alrededores, no se pueden regresar a sus estados iniciales.

1.1.4.5. Principio de Carnot

Con la introducción de los conceptos de reversibilidad, ahora es posible clasificar las máquinas térmicas como totalmente reversibles o irreversibles. Una máquina térmica totalmente reversible está libre de efectos disipativos y de desequilibrio durante su operación.

Si dentro de la máquina existen irreversibilidades de cualquier clase o resultan de interacciones de la máquina térmica con su ambiente, ésta se clasifica como irreversible. Considere ahora los teoremas siguientes relativos a la eficiencia térmica de las máquinas reversibles e irreversibles. Éstos constituyen el principio de Carnot.

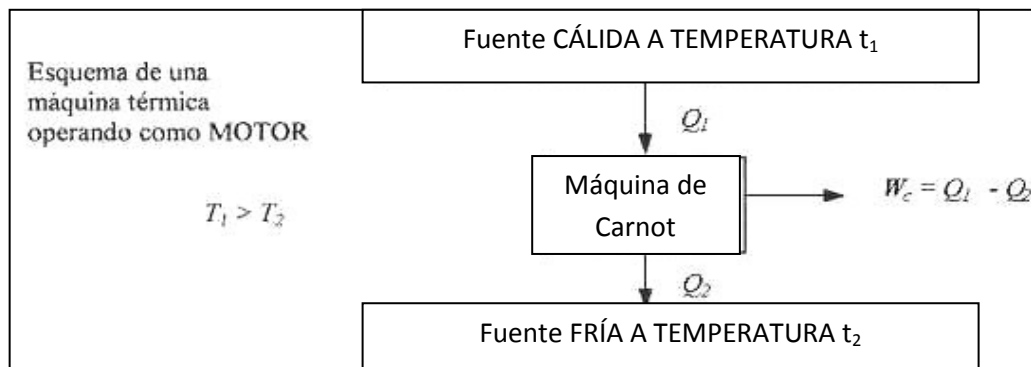
- La eficiencia de una máquina térmica irreversible es siempre menor que la eficiencia térmica de una totalmente reversible que funciona entre los mismos dos depósitos de calor.
- Las eficiencias térmicas de dos máquinas térmicas totalmente reversibles que funcionan entre los mismos dos depósitos de calor, son iguales.

1.1.4.6. El refrigerador y la bomba de calor de Carnot

Una máquina térmica de Carnot se describe como una totalmente reversible. Debido a su reversibilidad total, puede operarse en la dirección inversa. Como consecuencia, la máquina funciona como un refrigerador, o como una bomba térmica.

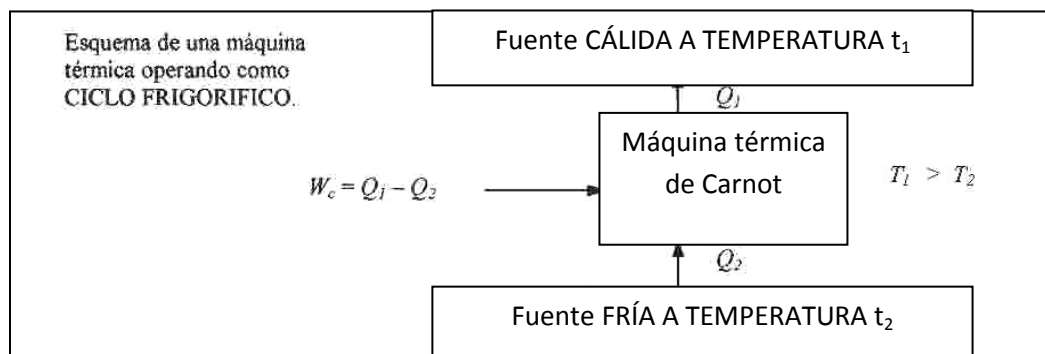
El calor se absorbe (extrae), en este caso, de una fuente de calor a temperatura baja, y se expulsa calor a un sumidero a temperatura alta. Todo refrigerador y bomba térmica necesitan trabajar siempre. En las figuras 2 y 3 se ve el esquema de una bomba de calor y el de un refrigerador, respectivamente. Es importante ver la dirección del calor y como esto se apega al enunciado de Clausius de la segunda ley.

Figura 2. **Bomba de calor de Carnot (motor)**



Fuente: RODRÍGUEZ, Jorge A. *Introducción a la termodinámica*. p. 199.

Figura 3. **Refrigerador**



Fuente: RODRÍGUEZ, Jorge A. *Introducción a la termodinámica*. p. 200.

1.1.4.7. Entropía

Es una magnitud que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir un trabajo; es el grado de desorden que poseen las moléculas que integran un cuerpo, o también el grado de irreversibilidad alcanzada después de un proceso que implique transformación de energía.

Las unidades de la entropía, en el Sistema Internacional, son el J/K (o Clausius), definido como la variación de entropía que experimenta un sistema cuando absorbe el calor de 1 *Joule* a la temperatura de 1 Kelvin.

1.1.5. Sistemas de refrigeración

Un sistema de refrigeración se utiliza para mantener cierta región del espacio a una temperatura menor a la de su entorno. El fluido de trabajo puede permanecer en una sola fase (refrigeración por gas), o puede aparecer en dos fases (refrigeración por compresión de vapor).

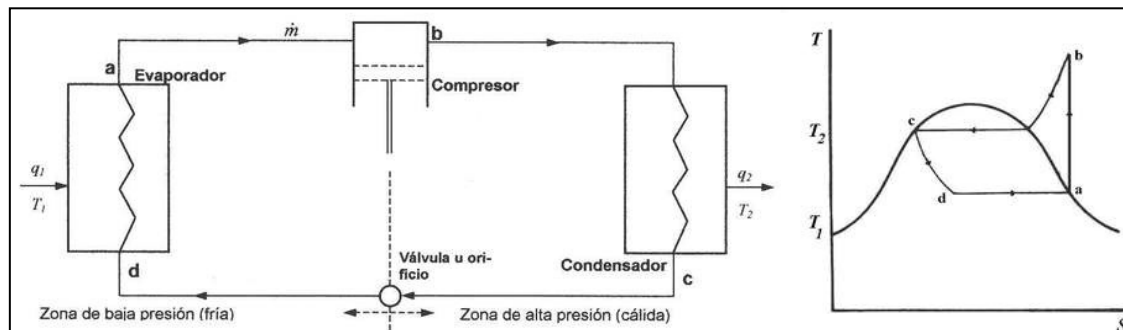
1.1.5.1. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El esquema del equipo para el ciclo, junto con los diagramas Ts del ciclo ideal se muestra en la figura 4. El ciclo de Carnot, aquí opera como máquina frigorífica, es decir que se recorre en sentido antihorario.

A lo largo de la trayectoria de expansión b-c se entrega calor q_2 al ciclo, aumentando la calidad de vapor a temperatura constante T_2 . Luego una compresión adiabática (isoentrópica) a lo largo de c→d eleva su temperatura hasta T_1 . Entonces se condensa el vapor a temperatura constante T_1 cediendo calor q_1 . El líquido así obtenido se expande isoentrópicamente a lo largo de a-b, enfriándose hasta la temperatura T_2 . Lógicamente, como el proceso consume trabajo W , el calor q_1 deberá ser mayor que el calor q_2 .

El rendimiento de una máquina frigorífica se mide en términos de lo obtenido (calor q_2 extraído de la zona fría) sobre lo gastado para ello, que en este caso es el calor $(q_1 - q_2)$, o sea el trabajo W .

Figura 4. Esquema y diagrama Ts



Fuente: RODRÍGUEZ, Jorge A. *Introducción a la termodinámica*. p. 431.

En el mismo, por simplicidad, se ha omitido el separador de líquido que normalmente se instala a la salida de la válvula. Este es un tanque o vasija donde se separa el gas del líquido. Este último va al evaporador, mientras que el gas pasa directamente al compresor.

El rendimiento del sistema dependerá del tipo de compresor utilizado y el tamaño del mismo. Para compresores alternativos el rendimiento oscila entre 0,85 para compresores chicos, hasta 0,93 en compresores grandes. El rendimiento volumétrico va desde 0,6 a 0,7 para compresores chicos (hasta 10 000 frig. /hora), 0,7 a 0,8 para compresores medianos (hasta 50 000 frig. /hora) y de 0,8 a 0,88 en compresores grandes (> 50 000 frig. /hora).

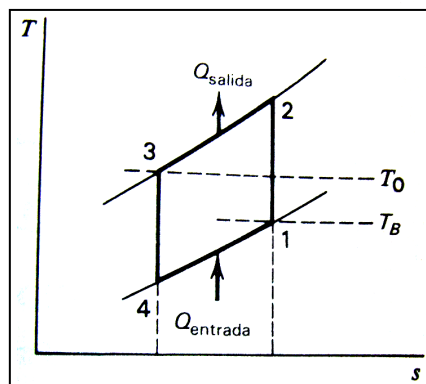
Para instalaciones frigoríficas de gran tamaño suelen usarse compresores centrífugos. Por ejemplo, en una instalación de 3 000 000 frigorías por hora, funcionando con un refrigerante que posee una temperatura de ebullición de -40 °C, el compresor debe aspirar alrededor de 20 000 m³/h de vapor. Empleando un compresor horizontal a pistón de dos etapas, la primera, debería tener un diámetro de 1,5 m., mientras que un compresor centrífugo será mucho menos costoso, ya que su peso, incluido reductor, será siete veces menor. Los compresores centrífugos son muy usados para ciclos frigoríficos. Pueden ser herméticamente cerrados, semiherméticos o abiertos.

La especificación de los sistemas de refrigeración usualmente se da con base en las toneladas de refrigeración que absorbe la unidad obrando en las condiciones de diseño. Una tonelada de refrigeración se define como una rapidez de extracción de calor en la región fría (o la rapidez de absorción de calor por parte del fluido que circula por el evaporador) de 211 kJ/min. o 200 Btu/min. Otra cantidad citada con frecuencia con respecto a un dispositivo frigorífico es el gasto volumétrico del refrigerante a la entrada del compresor. Se le llama desplazamiento efectivo del compresor.

1.1.5.2. Ciclo de refrigeración con gas (ciclo Brayton inverso)

La expansión adiabática de los gases se puede aprovechar para producir un efecto de refrigeración. En su forma más simple se logra invirtiendo el ciclo Brayton estándar empleado para los ciclos de potencia de gas. La figura 5 es un diagrama Ts del ciclo de Brayton ideal invertido.

Figura 5. Diagrama Ts ciclo Brayton inverso



Fuente: WARK, Kenneth Jr. *Termodinámica*. p. 743.

En primer lugar, el gas se comprime isoentrópicamente del estado 1 al estado 2, el cual se halla a una temperatura relativamente alta en comparación con la temperatura ambiente T_0 . Luego, se pasa a través de un intercambiador de calor, donde en el límite se puede enfriar hasta la temperatura ambiente. (En la práctica, el estado 3 puede hallarse aproximadamente 10 grados por encima de la condición ambiental.) El gas entra luego en un dispositivo de expansión adiabática, tal como una turbina, donde se produce trabajo y el gas se enfría hasta una temperatura T_4 , la cual es considerablemente inferior a la temperatura T_B de la región fría.

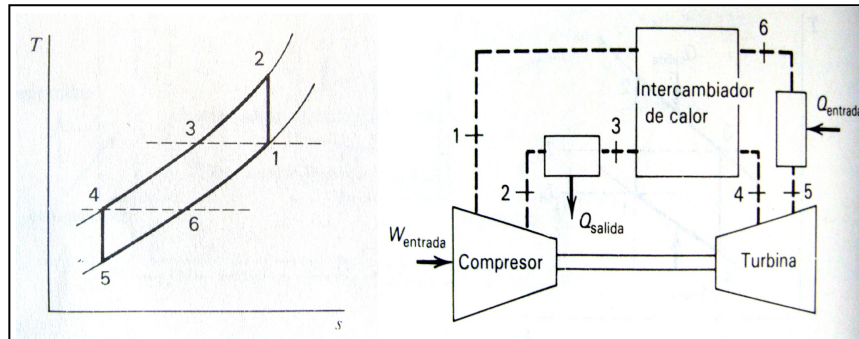
En consecuencia, se puede transferir calor desde la región fría hacia el gas a través de un intercambiador de calor y en teoría el gas se calienta hasta la temperatura T_B , que es también T_1 en el ciclo.

Se supone que en el ciclo ideal de refrigeración de gas el fluido pasa por el ciclo de manera internamente reversible. En el diagrama Ts de la figura 5, el área bajo la curva 4-1 representa el calor extraído de la región fría, el área encerrada por el ciclo 1-2-3-4-1 representa la entrada neta.

Las modificaciones al ciclo de Brayton invertido dan lugar a algunas aplicaciones útiles de los ciclos de refrigeración de gas. En la figura 6, por ejemplo, la temperatura del fluido después de tomar calor de la región fría es menor que del estado 3, donde el fluido entra el equipo de expansión. Si el gas en estado 1 se pudiese emplear para enfriar aun más al gas, por debajo de la temperatura del estado 3, una expansión subsecuente daría por resultado una temperatura menor a la del estado 4. De esta manera es posible conseguir temperaturas extremadamente bajas.

Físicamente, esto se lograría insertando un intercambiador de calor en el ciclo, como se ve en la figura 6. La transferencia de calor externa al ciclo da por resultado la caída usual de temperatura del estado 2 al estado 3 en la figura. Sin embargo, el regenerador adicional permite que el gas se enfríe aun más; hasta el estado 4, en caso ideal. El gas, después de la expansión, recibe calor de la región fría del estado 5 hasta el estado 6 y recibe también una cantidad extra de calor en el intercambiador desde el estado 6 hasta el estado 1.

Figura 6. **Ciclo Brayton inverso modificado**



Fuente: WARK, Kenneth Jr. *Termodinámica*. p. 744.

Dado el tipo de operaciones que ejecuta este ciclo encuentra gran aplicación en los sistemas de refrigeración industrial y comercial, un claro ejemplo es el funcionamiento de las refrigeradoras convencionales que se encuentran en los hogares o los sistemas de aire acondicionado en los automóviles, edificios, entre otros.

1.1.6. Mecanismos de transferencia de calor

Se definió calor como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura entre sistemas. Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro.

El calor se puede transferir de tres modos diferentes:

- Conducción
- Convección
- Radiación

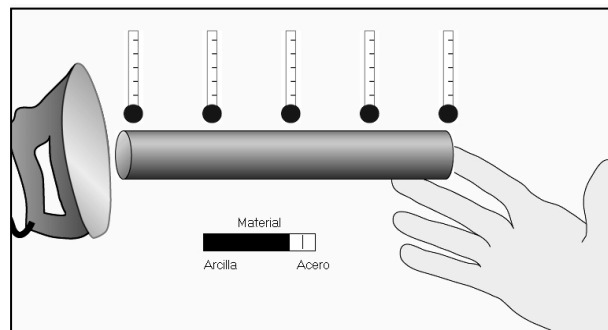
Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.

1.1.6.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas.

La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. La conducción es una forma de transmisión de calor sumamente eficiente, cualquier persona que haya tocado una pieza de metal caliente puede atestiguarlo. Un ejemplo se muestra en la figura 7.

Figura 7. Conducción



Fuente: Física Interactiva, <http://www.design-simulation.com>. 27-05-2009.

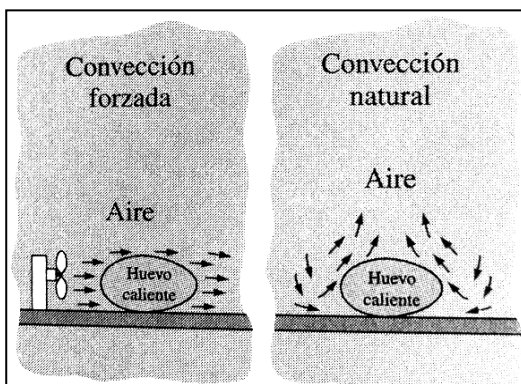
La velocidad de conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste. Su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. Dependerá también del aislamiento que tenga el cuerpo.

1.1.6.2. Convección

Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido, o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre una superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento, ver figura 8.

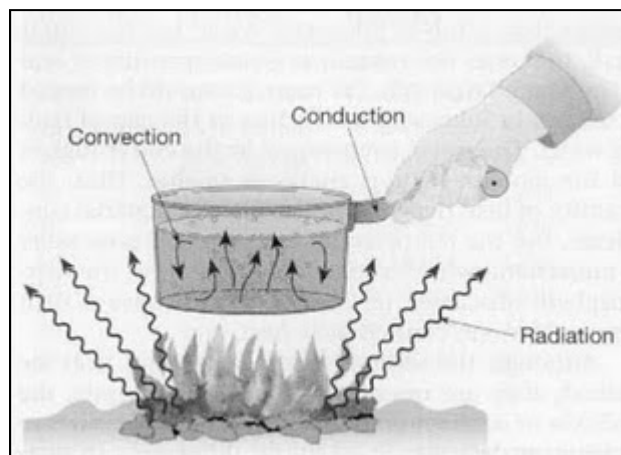
Figura 8. **Convección natural y forzada**



Fuente: ÇENGEL, Yunus. *Transferencia de calor*. p. 26.

Como contraste, se dice que es convección natural o libre (termosifón), si el movimiento de un fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en este fluido. La transferencia de calor entre el bloque y el aire circundante será por conducción si la diferencia de temperatura entre el aire y el bloque no es suficientemente grande como para vencer la resistencia de ese aire al movimiento, y por consiguiente, para iniciar corrientes naturales de convección, figura 9.

Figura 9. **Diferencia entre convección y conducción**



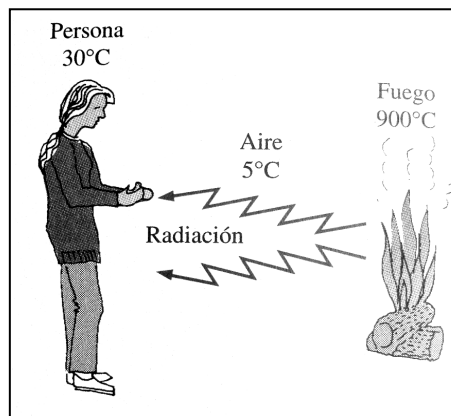
Fuente: ÇENGEL, Yunus A. *Transferencia de Calor*. p. 334.

Los procesos de transferencia de calor que comprenden cambio de fase de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de gotitas de líquido durante la condensación.

1.1.6.3. Radiación

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio impuesto. De hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. De esta manera llega a la Tierra la energía del Sol. Un ejemplo de radiación se muestra en la figura 10.

Figura 10. Radiación



Fuente: ÇENGEL, Yunus A. *Transferencia de Calor*. p. 562.

1.1.6.4. Mecanismos simultáneos de transferencia de calor

Se describió que existen tres mecanismos de transferencia de calor, pero no pueden existir simultáneamente los tres en un medio.

Por ejemplo, la transferencia de calor sólo ocurre por conducción en los sólidos opacos, pero por conducción y radiación en los sólidos semitransparentes, como el vidrio. Por tanto, un sólido puede comprender conducción y radiación pero no convección. Sin embargo, un sólido puede presentar transferencia de calor por convección y/o radiación en sus superficies expuestas a un fluido o a otras superficies.

La transferencia de calor es por conducción y, posiblemente por radiación en un fluido estático (sin movimiento masivo del fluido), y por convección y radiación en un fluido que fluye. En ausencia de radiación, la transferencia de calor a través de un fluido es por conducción o convección, dependiendo de la presencia de algún movimiento masivo de ese fluido. La convección se puede concebir como conducción y movimiento fluido combinado, y la conducción en un fluido se puede concebir como un caso especial de convección en ausencia de algún movimiento de ese fluido.

Asimismo, los gases son prácticamente transparentes a la radiación, excepto por algunos gases que se sabe absorben radiación con gran fuerza en ciertas longitudes de onda. Pero, en la mayor parte de los casos, un gas entre dos superficies sólidas no interfiere con la radiación y actúa de manera efectiva como el vacío. Por otra parte, los líquidos suelen ser fuertes absorbentes de radiación. Por último, la transferencia de calor a través del vacío solo se produce por radiación, ya que la conducción o la convección requieren de la presencia de un medio material.

1.1.6.5. Intercambiadores de calor

Son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí. En la práctica, los intercambiadores de calor son de uso común en una amplia variedad de aplicaciones, desde los sistemas domésticos de calefacción y acondicionamiento del aire hasta los procesos químicos y la producción de energía en las plantas grandes. Los intercambiadores de calor difieren de las cámaras de mezclado en el sentido de que no permiten que se combinen los dos fluidos que intervienen.

En el intercambiador la transferencia de calor suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa. En el análisis de los intercambiadores de calor resulta conveniente trabajar con un coeficiente de transferencia de calor total U que toma en cuenta la contribución de todos estos efectos sobre dicha transferencia. La velocidad de la transferencia de calor entre los dos fluidos en un lugar dado a un intercambiador depende de la magnitud de la diferencia de temperatura local, la cual varía a lo largo de dicho intercambiador.

Existe mucha variación de diseños en los equipos de intercambio de calor. En ciertas ramas de la industria se han desarrollado intercambiadores muy especializados para ciertas aplicaciones puntuales.

1.1.6.6. Refrigeración y refrigerador

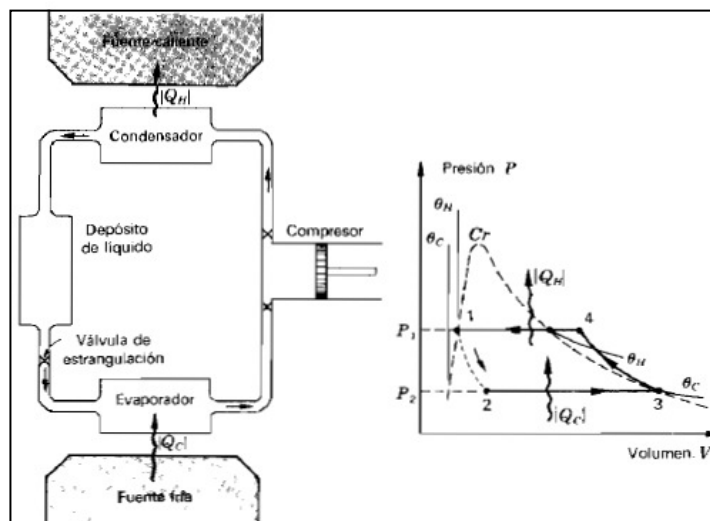
Refrigerar suele ser sinónimo de enfriar, pero aquí se hará una clara distinción entre ambas definiciones o términos, reservando la de refrigeración para cuando el enfriamiento ocurre a temperaturas por debajo de la atmosférica. En ambos casos se trata de extraer calor del sistema, pero la refrigeración, así entendida, requiere el aporte de energía del exterior, mientras que el enfriamiento podría conseguirse simplemente dejando el sistema caliente en contacto con la atmósfera.

Se puede ver un refrigerador como una máquina de calor que opera en reversa. Una máquina de calor toma calor de un lugar caliente y lo cede a un lugar más frío. Un refrigerador hace lo contrario; toma calor de un lugar frío (el interior del refrigerador) y lo cede a un lugar más caliente (generalmente al aire del sitio donde está el refrigerador). Desde el punto de vista económico, el mejor ciclo de refrigeración es el que saca el máximo de calor Q del refrigerador con el menor gasto de trabajo mecánico W . Por tanto, la razón es Q / W ; cuando mayor sea, mejor será el refrigerador. Se llama a esta razón coeficiente de rendimiento, denotado como K , un número adimensional.

Los principios del ciclo de refrigeración común se muestran esquemáticamente en la figura 11. El circuito contiene un fluido refrigerante (la sustancia de trabajo). El evaporador está a baja temperatura y baja presión y el condensador está a alta temperatura y alta presión. Por lo regular en ambos lados se contiene líquido y vapor en equilibrio de fase.

El compresor admite fluido (en estado gaseoso), lo comprime adiabáticamente y lo alimenta al condensador a alta presión. La temperatura del fluido es entonces mayor que la del aire que rodea al condensador, así que el refrigerante cede calor y se condensa parcialmente (se convierte en líquido).

Figura 11. **Esquema de refrigerador**



Fuente: ZEMANSKY, Mark W. *Calor y termodinámica*. p. 158.

Luego, el fluido se expande adiabáticamente (pasa de líquido a gas) hacia el evaporador con una rapidez controlada por la válvula de expansión. Al expandirse, el fluido se enfría considerablemente, tanto que está más frío que el entorno del evaporador. El fluido absorbe calor de su entorno, enfriándolo y vaporizándose parcialmente. A continuación el fluido pasa al compresor para iniciar otro ciclo. El compresor, usualmente impulsado por un motor eléctrico, requiere aporte de energía y realiza trabajo W sobre la sustancia de trabajo durante cada ciclo.

1.1.7. Mezclas entre gases y líquidos

Los gases son materia no agregada, que siempre se pueden interponer bien con las partículas de otros cuerpos. La mezcla de un gas en un líquido se conoce como disolución, por ejemplo el dióxido de carbono en el agua; y la mezcla de un líquido en un gas como aerosol, por ejemplo las nubes.

1.1.7.1. Gas ideal

Es un gas hipotético formado por partículas puntuales, sin atracción ni repulsión entre ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos (conservación de momento y energía cinética). Los gases reales que más se aproximan al comportamiento del gas ideal son los gases monoatómicos en condiciones de baja presión y alta temperatura tales como los gases nobles y el aire.

1.1.7.2. Aire seco y aire atmosférico

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y pequeñas cantidades de otros gases, normalmente el aire en la atmósfera contiene cierta cantidad de vapor de agua (o humedad) y se conoce como aire atmosférico. En contraste, el aire que no contiene vapor de agua se denomina aire seco, porque su composición permanece relativamente constante, pero la cantidad de vapor de agua varía por la condensación o evaporación de los océanos, lagos, ríos, regaderas e incluso del agua del cuerpo humano.

1.1.7.3. Humedad específica y relativa

La cantidad de vapor de agua en el aire puede determinarse de varias maneras. Es probable que la más lógica sea precisar directamente la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, a la que se denomina humedad absoluta o específica ω .

Por definición, el aire seco no contiene vapor de agua y, por ende, su humedad específica es 0. Al añadir algo de vapor de agua al aire seco, la humedad específica crecerá hasta que el aire ya no pueda contener más humedad. En este punto se le denomina aire saturado. Cualquier humedad agregada al aire saturado se condensará.

La cantidad de humedad que el aire contiene (m_v) respecto a la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura (m_g) se conoce como humedad relativa ϕ . La humedad relativa varía de 0 para aire seco a 1 para aire saturado. La cantidad de humedad que el aire puede contener depende de su temperatura. Por lo tanto, la humedad relativa del aire cambia con la temperatura aunque su humedad específica permanezca constante.

1.1.7.4. Temperatura de bulbo seco

Es la temperatura ordinaria del aire atmosférico. Ésta se puede medir fácilmente con un termómetro de mercurio.

1.1.7.5. Temperatura de rocío

La temperatura de punto de rocío T_{pr} se define como la temperatura a la que se inicia la condensación si el aire se enfría a presión constante. En otras palabras, T_{pr} es la temperatura de saturación del agua correspondiente a la presión del vapor. Un ejemplo de temperatura de rocío se muestra en la figura 12. Al sacar una lata de soda del refrigerador su temperatura es menor a la temperatura de rocío del ambiente, por lo que la humedad del aire se condensará en la superficie de la lata haciendo que esta sude.

Figura 12. **Temperatura de rocío**



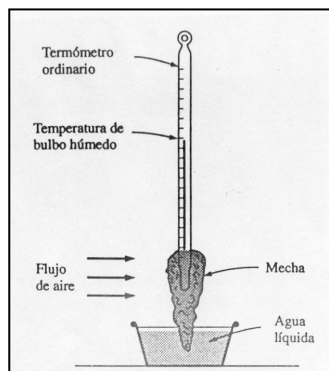
Fuente: ÇENGEL, Yunus A. *Termodinámica*. p. 720.

1.1.7.6. Saturación adiabática y de bulbo húmedo

La temperatura de saturación adiabática se define como la temperatura del aire tras pasar por un saturador en el que se eleva la humedad relativa hasta un 100% de forma adiabática irreversible. Un saturador adiabático es un aparato construido para el fin anterior. Es un conducto muy largo con un depósito de agua líquida en su interior. El pasar una corriente de aire atmosférico evapora parte del agua líquida hasta que su humedad relativa es el 100%. Al evaporar el agua, el aire atmosférico se enfría.

La temperatura de bulbo húmedo es aquella que da un termómetro bajo sombra, con el bulbo envuelto en una mecha de algodón húmedo bajo una corriente de aire. Este tipo de medición se utiliza para dar una idea de la sensación térmica, o en los psicrómetros para calcular la humedad relativa y la temperatura del punto de rocío, ver figura 13.

Figura 13. **Temperatura de bulbo húmedo**



Fuente: ÇENGEL, Yunus A. *Termodinámica*. p. 724.

1.1.7.7. **Refrigerantes**

En la refrigeración mecánica se requiere un proceso que pueda transmitir grandes cantidades de calor económica y eficientemente, y que pueda repetirse continuamente. Los procesos de evaporación y condensación de un líquido son, por lo tanto, los pasos lógicos en el proceso de refrigeración.

Prácticamente cualquier líquido puede ser usado para absorber calor por evaporación. El agua es ideal en muchos aspectos, pero hierve a temperaturas demasiado altas para usarse en operaciones de enfriamiento normales, y se congela a temperaturas demasiado altas para usos en baja temperatura. Un refrigerante debe satisfacer dos importantes requisitos:

- Absorber el calor rápidamente a la temperatura requerida por la carga.
- Usar el mismo refrigerante constantemente por razones de economía y para enfriamiento continuo.

No existe el refrigerante perfecto, y hay una gran variedad de opiniones sobre cuál es el más apropiado para aplicaciones específicas. En trabajos a temperaturas extra bajas, o en instalaciones con grandes compresores centrífugos, se usan refrigerantes especiales, pero para refrigeración comercial normal, se usan casi exclusivamente los refrigerantes 12, 22, 502. Llamados frecuentemente R-12, R-22, R-502, y aunque originalmente fueron creados por Dupont (empresa de origen estadounidense dedicada a la industria química) como refrigerantes Freón, las numeraciones usadas son ahora comunes en todos los fabricantes.

- Refrigerante 12: es muy usado en refrigeración doméstica y comercial, así como en aire acondicionado. En temperaturas inferiores a su punto de ebullición, es un líquido transparente y casi sin color. Es casi inodoro, no es tóxico ni irritante y es apropiado para aplicaciones de alta, mediana y baja temperatura.
- Refrigerante 22: es similar al R-12 en sus características; sin embargo, tiene presiones de saturación mucho más altas que el R-12 para temperaturas equivalentes, tiene un calor latente de evaporación mucho mayor y un volumen específico inferior. Como resultado de lo anterior, para un volumen dado de vapor de refrigeración saturado el R-22 tiene una capacidad de refrigeración mucho mayor. Este hecho permite el uso de menores desplazamientos en el compresor, resultando compresores más pequeños para obtener resultados comparables con el R-12.

El tamaño y la economía son factores críticos, tales como en unidades paquete, donde el R-12 es comúnmente usado. Por sus características a bajas temperaturas de evaporación o altos índices de compresión, la temperatura del vapor del R-22 comprimido es tan alta, que frecuentemente daña al compresor. Se recomienda el uso del R-22 en sistemas de un solo paso para alta y mediana temperaturas únicamente, aun cuando es usable en bajas temperaturas en sistemas de varios pasos cuando la temperatura del vapor es controlada.

- Refrigerante 502: es una mezcla azeotrópica del R-22 y el R-115. Un azeótropo es el nombre científico dado a cierta mezcla de dos compuestos en la cual la mezcla resultante tiene características diferentes a las de sus componentes, y que puede evaporarse y condensarse sin cambiar su composición.

En la mayoría de sus características físicas, el R-502 es similar al R-12 y al R-22. Aun cuando su calor latente de evaporación no es tan alto como el del R-12 y el del R-22, su vapor es mucho más pesado, o sea que su volumen específico es menor. Por lo tanto, para ciertos desplazamientos es comparable a la del R-22 y en bajas temperaturas es generalmente mayor. Así como el R-22 puede usarse un compresor con menor desplazamiento para obtener resultados equivalentes al R-12, el R-502 es recomendado para uso en bajas temperaturas por sus excelentes características en bajas temperaturas, y también para todas las aplicaciones de sólo un paso donde la temperatura de evaporación sea inferior a $-17,8^{\circ}\text{C}$ (0°F). También es muy satisfactorio su uso en sistemas de doble paso y en aplicaciones para temperaturas extra bajas, y se está volviendo sumamente común para usos de temperatura media.

Tabla I. **Comparación del efecto de refrigeración**

CONDICIONES DE OPERACIÓN	Temperatura de evaporación	-29°C	-20°F
	Temperatura de condensación	43°C	110°F
	Temperatura del líquido sub-enfriado	-17,8°C	0°F
	Temperatura de gas de retorno	18,3°C	65°F

Fuente: COPELAND. *Manual de refrigeración*. p. 2-3.

Tabla II. **Propiedades comparativas de diferentes refrigerantes**

Propiedades Comparativas	Sistema Métrico				Sistema Inglés			
	Uni.	R-12	R-22	R-502	Uni.	R-12	R-22	R-502
Presión saturación 21°C (70°F)	kg/cm ²	4,94	8,54	9,60	PSIG	70,2	121,4	136,6
Punto ebullición 1.034 kg/Cm ² (14.7 PSIA)	°C	-29,8	-40,8	-45,61	°F	-21,6	-41,4	-50,1
Densidad del líquido a 21°C (70°F)	gr/cm ³	1,32	1,21	1,26	Lb/ft ³	82,7	75,5	78,6
Solubilidad en agua a 25.6°C (78°F)	*PPM	93	1 300	560	PPM	93	1 300	560
Solubilidad agua -40°C (-40°F)	PPM	1,7	120	40	PPM	1,7	120	40
**Presión de evaporación	kg/cm ²	0,042	0,072	0,109	PSIG	0,6	10,2	15,5

Continuación tabla II.

Presión de condensación	kg/cm ²	9,56	15,89	17,30	PSIG	136	226	246
Índice de compresión		9,9	9,7	8,6		9,9	9,7	8,6
Volumen específico del gas de retorno	cm ³ /gr	4,85	0,405	0,266	ft ³ /Lb	3,03	2,53	1,66
Efecto de refrigeración	kcal / kg	96,7	131,5	87,7	Btu / Lb	53,7	73,03	48,72
Efecto de refrigeración	kcal / m ³	0,158	0,257	0,261	Btu / ft ³	17,8	28,9	29,3
* PPM = Partes Por Millón. ** Temperaturas de esta propiedad en adelante referirse a tabla I								

Fuente: COPELAND. Manual de refrigeración. p. 2-3.

Las tablas I y II muestran las propiedades de los refrigerantes bajo condiciones de temperatura o presión específica. Las propiedades más importantes a tener en cuenta son:

- Temperatura de saturación de refrigerantes: a temperaturas normales, los tres refrigerantes pueden existir únicamente en la forma de gas, a menos que se sometan a altas presiones, puesto que sus puntos de ebullición a la presión atmosférica son muy inferiores a -17,8°C (0°F); por esta razón, los refrigerantes siempre se almacenan y se transportan en tanques de presión especial.

Siempre que un refrigerante en forma de líquido o vapor se encuentre presente en un sistema cerrado, sin la influencia de presiones externas, el refrigerante se evaporará o condensará dependiendo de la temperatura exterior, hasta que la temperatura que corresponde a la presión de saturación y la temperatura exterior se igualen y no exista transmisión de calor. Un descenso en la temperatura exterior permitirá flujo de calor del refrigerante hacia el exterior causando condensación y disminución de presión. Un aumento en la temperatura exterior causará flujo de calor hacia el refrigerante, dando lugar a la evaporación y al aumento de presión.

- Evaporación de refrigerantes: supongamos que el refrigerante en un sistema de refrigeración tiene su temperatura equilibrada con la temperatura exterior. Si en vez de cambiar la temperatura exterior, se disminuye la presión del sistema, reducirá su punto de saturación, por lo que la temperatura del refrigerante líquido se encontrará por encima de su punto de ebullición y comenzará éste a hervir absorbiendo calor del proceso y gasificándose conforme se produce el cambio de estado.

Ahora fluirá el calor del exterior hacia el sistema debido a la baja temperatura del refrigerante, y la ebullición continuará hasta que la temperatura exterior se reduzca a la temperatura de saturación del refrigerante, o hasta que la presión del sistema aumente nuevamente a la presión de saturación equivalente a la temperatura exterior. Si existe un medio, como un compresor, para abstraer el vapor del refrigerante para que no aumente la presión, mientras que el refrigerante está siendo inyectado en el sistema, podrá haber una refrigeración continua.

- Condensación de refrigerantes: el refrigerante se encuentra dentro de un sistema de refrigeración con su temperatura igualada a la temperatura exterior. Si se introduce gas refrigerante caliente en el sistema, la presión del sistema de refrigeración se eleva aumentando el punto de saturación.

Conforme el calor del vapor caliente que entra en el sistema es transferido al refrigerante líquido y a las paredes del sistema, la temperatura del vapor refrigerante se reduce hasta su temperatura de condensación y principia dicho proceso. El calor originado por el calor latente de condensación fluye del sistema hacia el exterior hasta que la presión en el sistema se reduce a la presión de saturación equivalente a la temperatura exterior. Si existe algún medio, tal como un compresor, para mantener una alimentación de gas refrigerante caliente en alta presión, mientras que al mismo tiempo el refrigerante líquido es substraído, ocurrirá una condensación continua.

- Relaciones refrigerantes y aceites: en compresores reciprocantes, el aceite y el refrigerante se mezclan continuamente. Los aceites refrigerantes son solubles en refrigerantes líquidos y, a temperaturas normales en una cámara, se mezclan completamente. La capacidad de un refrigerante líquido para mezclarse con aceite se llama miscibilidad, y se dice que el refrigerante es miscible con aceite.

El aceite que circula en un sistema de refrigeración puede ser expuesto, tanto a muy altas como a muy bajas temperaturas. Debido a la naturaleza crítica de la lubricación bajo estas condiciones y al daño que puede causar en el sistema la cera y otras impurezas del aceite, únicamente pueden usarse aceites altamente refinados y especialmente preparados para refrigeración.

En general, los aceites con base nafténica son más solubles en refrigerantes que los aceites con base parafínica. Sin embargo, para muy bajas temperaturas, aun los aceites de base nafténica pierden solubilidad y se separan del refrigerante, formando dos capas. Esta separación no afecta necesariamente la capacidad lubricativa del aceite, pero puede crear problemas por falta de lubricación en las diferentes partes del sistema que lo requieren.

Puesto que el aceite debe pasar por los cilindros de los compresores para lubricarlos, siempre circula una pequeña cantidad de aceite con el refrigerante; el aceite y el gas refrigerante no se mezclan fácilmente, y el aceite sólo puede circular correctamente a través del sistema si las velocidades del gas son suficientemente altas para barrer el aceite. Si las velocidades no son suficientemente altas, el aceite se estacionará en la parte inferior de los tubos disminuyendo la transmisión de calor y posiblemente causando una falta de aceite en el compresor. Conforme se reducen las temperaturas de evaporación, este problema se vuelve más crítico puesto que la viscosidad del aceite aumenta con el descenso de la temperatura. Por estas razones, es esencial un diseño correcto de la tubería del sistema de refrigeración para obtener un retorno de aceite satisfactorio.

Una de las características básicas de una mezcla de refrigerante y aceite en un sistema cerrado es el hecho de que el refrigerante es acarreado por el aceite y dicho refrigerante se evaporará y emigrará, a través del sistema, hasta llegar al cárter aun cuando no exista diferencia de presiones para causar el movimiento; al llega al cárter, el refrigerante se condensará en forma de líquido y esta emigración continuará hasta que el aceite se encuentre saturado con refrigerante líquido.

Excesivo refrigerante en el cárter del compresor puede dar como resultado una espuma violenta en ebullición, expulsando fuera del cárter todo el aceite y causando problemas de lubricación. Por lo tanto, deben tenerse precauciones para prevenir la acumulación de excesivo refrigerante líquido en el compresor. El R-22 y el R-502 son mucho menos solubles en el aceite que el R-12 y por esta razón, el diseño y las conexiones correctas de las tuberías para estos dos refrigerantes es mucho más crítica con respecto al retorno de aceite.

1.2. Conceptos eléctricos

La electricidad es un fenómeno físico cuyo origen son las cargas eléctricas y cuya energía se manifiesta en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos y químicos, entre otros.

1.2.1 Sensores y elemento final de control

La cadena de realimentación resulta imprescindible en muchos automatismos industriales para poder realizar un control, con las conocidas ventajas en cuanto a cancelación de errores y posibilidades de regulación precisa y rápida. A su vez, docta cadena de realimentación requiere unos elementos de captación de las magnitudes de planta a los que se llaman genéricamente sensores o transductores y unos circuitos adaptadores llamados circuitos de interfaz.

Por otro lado, es evidente la necesidad de elementos que actúen sobre la parte de potencia de la planta. La potencia necesaria para actuar sobre estos elementos puede ser considerable y, a veces, no puede ser suministrada directamente por el sistema de control.

En tales casos, se requieren unos elementos intermedios encargados de interpretar las señales de control y actuar sobre la parte de potencia propiamente dicha. Dichos elementos se denominan habitualmente preaccionamientos y cumplen una función de amplificadores, ya sea de señales análogas o digitales.

También es habitual que los sensores requieran una adaptación de la señal eléctrica que suministran para que sean conectables a un determinado sistema de control. Esta función la realizan los bloques de interfaz, que pueden ser totalmente independientes del sensor o estar parcialmente incluidos en él.

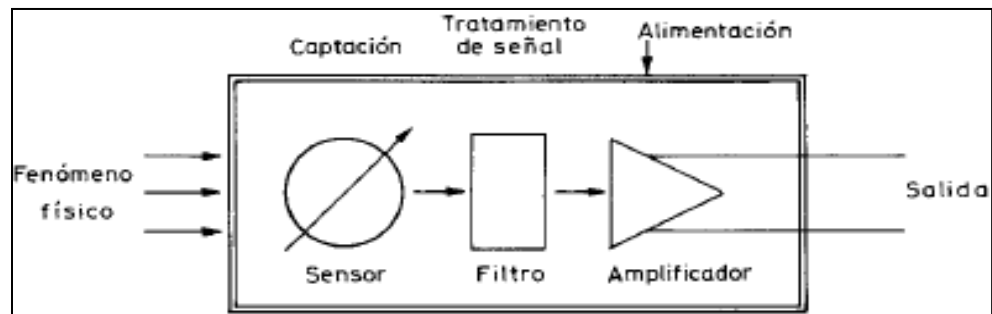
1.2.1.1. Clasificación de sensores

Los términos sensor y transductor se suelen aceptar como sinónimos, si hubiera que hacer alguna distinción, el término transductor es quizás más amplio, incluyendo una parte sensible o captador propiamente dicho y algún tipo de circuito de acondicionamiento de la señal detectada. En el estudio de los transductores, cuya salida es una señal eléctrica, se puede dar la siguiente definición: Un transductor es un dispositivo capaz de convertir el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada, ya sea en forma análoga o digital.

No todos los transductores tienen porque dar una salida en forma de señal eléctrica. Como ejemplo, puede valer el caso de un termómetro basado en la diferencia de la dilatación de una lámina bimetálica, donde la temperatura se convierte directamente en un desplazamiento de una aguja indicadora. Sin embargo, el término transductor suele asociarse bastante a dispositivos cuya salida es alguna magnitud eléctrica o magnética.

Los transductores basados en fenómenos eléctricos o magnéticos, suelen tener una estructura general como la que muestra la figura 14, en la cual se puede distinguir las siguientes partes:

Figura 14. **Estructura geométrica de un transductor**



Fuente: ROMERAL, José Luis; BALCELLS, Joseph. *Autómatas programables*. p. 113.

- Elemento sensor o captador: convierte las variaciones de una magnitud física en variaciones de una magnitud eléctrica o magnética, que se denominan, habitualmente señal.
- Bloque de tratamiento de señal: si existe, suele filtrar, amplificar, linealizar y, en general, modificar la señal obtenida en el captador, por regla general utilizando circuitos electrónicos.
- Etapa de salida: ésta comprende los amplificadores, interruptores, conversores de código, transmisores, y en general todas aquellas partes que adaptan la señal a las necesidades de la carga exterior.

Se puede clasificar los transductores de tipo eléctrico o magnético de la siguiente manera:

- Clasificación según el tipo de señal de salida: según la norma de codificar la magnitud medida se puede establecer una clasificación en:
 - Analógicos: Aquellos que dan como salida un valor de tensión o corriente variable en forma continua dentro del campo de medida. Es frecuentemente para este tipo de transductores que se incluye una etapa de salida para suministrar señales normalizadas de 0-10 V o 4-20 mA.
 - Digitales: son los que dan como salida una señal codificada en forma de pulsos o en forma una palabra digital codificada en binario, BCD u otro sistema cualquiera.
 - Todo-nada: indican únicamente cuando la variable detectada rebasa un cierto umbral o límite. Puede considerarse como un caso límite de los sensores digitales en el que se codifican sólo dos estados.

Otro criterio de clasificación, relacionada con la señal de salida, es el hecho de que el captador propiamente dicho requiera o no una alimentación externa para su funcionamiento. En el primer caso se denomina sensor pasivo y en el segundo, activo o directo.

Los sensores pasivos se basan, por lo general, en la modificación de la impedancia eléctrica o magnética de un material bajo determinadas condiciones físicas o químicas (resistencia, capacidad, inductancia, reluctancia, etc.). Este tipo de sensores, debidamente alimentados, provoca cambios de tensión o de corriente en un circuito, los cuales son recogidos por el circuito de interfaz.

Los sensores activos son, en realidad, generadores eléctricos, generalmente de pequeña señal. Por ello no necesitan alimentación exterior para funcionar, aunque si suelen necesitarla, para amplificar la débil señal del captador.

- Clasificación según la magnitud física a detectar: en cuanto a la naturaleza de la magnitud física a detectar, existe una gran variedad de sensores en la industria. En general, los principios físicos en los que suelen estar basados los elementos sensores son los siguientes:
 - Cambios de resistencia
 - Electromagnetismo (inducción electromagnética)
 - Piezoelectricidad
 - Efecto fotovoltaico
 - Termoelectricidad

1.2.1.2. Transductores de temperatura

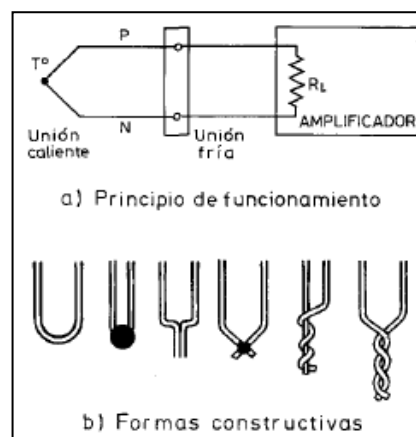
Es uno de los parámetros que muchas veces debe controlarse en los procesos industriales. Atendiendo al principio de funcionamiento de la mayoría de sensores industriales, se puede distinguir los siguientes tipos:

- Termostatos: son sensores con salida de tipo todo o nada que conmutan de cierto valor de temperatura. Los más simples están basados generalmente en la diferencia de dilatación de dos metales y los más sofisticados suelen construirse a base de un sensor de tipo analógico y uno o varios comparadores con histéresis. Los de tipo bimetalico reutilizan típicamente en sistemas de climatización y en algunas aplicaciones industriales como interruptores de protección (falta de ventilación, etc.).

Los formados por una sonda analógica y un sistema comparador tienen la ventaja de ser, en general, regulables y de poder utilizar sondas de muy pequeño tamaño (sensores PTC o NTC de semiconductores) que pueden ubicarse en el interior de bobinados, máquinas, recintos con atmósfera explosiva u otros emplazamientos donde se requiere que ocupen poco espacio o que no se produzca arco eléctrico por apertura de un circuito.

- Termopares: son sensores activos de tipo analógico basados en el efecto *Seebeck*. Dicho efecto consiste en la aparición de una tensión eléctrica entre dos piezas de distintos metales unidas o soldadas por un extremo, cuando este se calienta (unión caliente) y se mantienen los otros dos extremos a una misma temperatura inferior (unión fría). Este principio se ilustra en la figura 15.

Figura 15. **Termopar**



Fuente: ROMERAL, José Luis; BALCELLS, Joseph. *Autómatas programables*. p. 131.

Para que la tensión de salida sea proporcional a la temperatura en unión caliente, debe mantenerse constante la temperatura de las uniones frías, o compensarse la señal a que darían lugar sus variaciones mediante un circuito adicional. Si se requiere una buena precisión; se prefiere generalmente compensar las variaciones de temperatura en la unión fría, aunque esto requiere de un sensor adicional, que suele ser una *NTC*. La tabla III indica algunas de las uniones de metales y aleaciones más utilizadas en la construcción de termopares, así como sus principales características.

Tabla III. **Características de distintos tipos de termopares**

Materiales	Tipo	Constante termoelectrónica	Rango de temperaturas	Característica más relevante
FE-Const.	J	0,057 mV/°C	0 – 600°C	Robustez
NiCr-Ni	K	0,041 mV/°C	0 – 1 000°C	Robustez
Rh-Pt	R	0,012 mV/°C	0 – 1 600°C	Estabilidad
NiCr-Const.	E	0,075 mV/°C	0 – 600°C	Sensibilidad
Nota: Const. = Constantán, aleación de 58% de Cu y 42% de Ni				

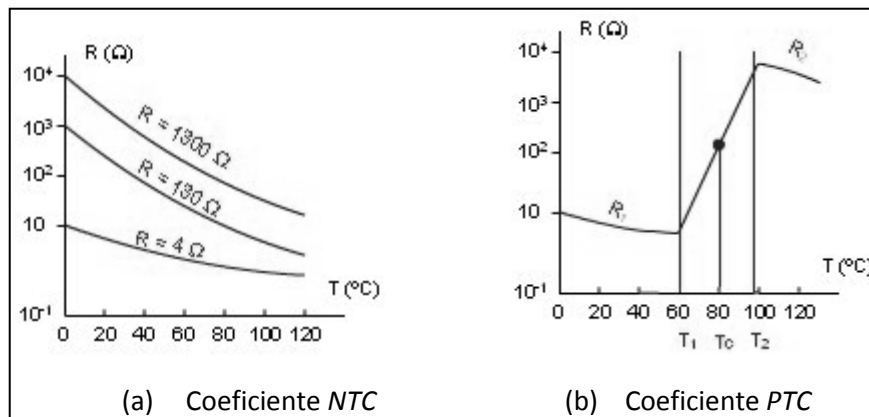
Fuente: ROMERAL, José Luis; BALCELLS, Joseph. *Autómatas programables*. p. 131.

Se observa que los valores de sensibilidad son realmente bajos y, por tanto, requerirán amplificadores de señal de muy bajo ruido y de una gran resolución. Se puede aumentar la sensibilidad a base de conectar termopares en serie si el aspecto volumen no es importante, ya que, en general, el termopar es un sensor económico.

- Termorresistencias: los conductores eléctricos presentan, en general, un cambio de resistencia con la temperatura. Aprovechando esta propiedad, se construyen sondas de temperatura, pero para ello se requiere un material cuyo coeficiente se mantenga relativamente constante y que dé una buena sensibilidad. Las sondas industriales se suelen construir a base de platino, material cuyo coeficiente térmico es $0,00385 \Omega/^{\circ}\text{C}$. Dichas sondas suelen tener un valor nominal de 100Ω a 0°C , de donde se deriva el nombre de Pt100.

Las termorresistencias pueden ser *PTC* y *NTC*, las gráficas se muestran en la figura 16. Éstos suelen presentar coeficientes de sensibilidad bastante mayores, en el caso de metales, pero a costa de una gran pérdida de linealidad.

Figura 16. **Coefficiente *NTC* y *PTC***



Fuente: Electrónica básica. http://d1105488.mydomainwebhost.com/usuarios/Toni/web_electronica_3.html. 24-07-2009.

Las *PTC* (*Positive Temperature Coefficient*) son resistencias construidas a base de óxidos de bario y titanio, que muestran cambios muy bruscos de valor a partir de una cierta temperatura. Precisamente la temperatura de cambio es un parámetro característico de las PTC.

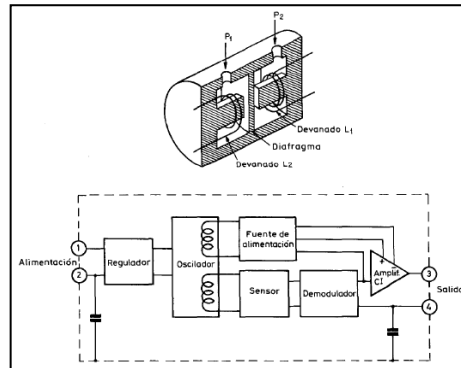
Las *NTC* son resistencias con un coeficiente de temperatura negativo (*Negative Temperature Coefficient*), construidas a base de óxidos de hierro, cromo, cobalto, manganeso y níquel dopados con iones de titanio o litio.

1.2.1.3. Transductores de presión

Los transductores de presión suelen estar basados en la deformación de un elemento elástico (membrana, tubo de Bourdon, etc.), cuyo movimiento bajo la acción del fluido es detectado por un transductor de pequeños desplazamientos (galgas, transformadores diferenciales, elementos piezoeléctricos, etc.), del que se obtiene una señal eléctrica proporcional a la presión. Los transductores de presión más frecuentes son los de diafragma o membrana. El diafragma consiste en una pared delgada que se deforma bajo el efecto de la presión. Los transductores de presión pueden efectuar dos tipos de medidas:

- Presión absoluta, o medida respecto al vacío, ver figura 17.
- Presión diferencial, o relativa, midiendo la diferencia de presión entre dos puntos.

Figura 17. **Transductor de presión de membrana**



Fuente: ROMERAL, José Luis; BALCELLS, Joseph. *Autómatas programables*. p. 133.

1.2.1.4. Elemento final de control

Todos los preaccionamientos que se conectan a la salida de los sistemas de control suelen tener mando eléctrico. Existen varios tipos de elementos finales pero los más importantes son el relé, el contactor y los servomotores de tipo eléctrico. Estos últimos están fuera del alcance del presente.

1.2.2. Relés y contactores

Los relés y contactores son dispositivos electromagnéticos que conectan o desconectan un circuito eléctrico de potencia al excitar un electroimán o bobina de mando. La diferencia entre relé y contactor está en la potencia que es capaz de seccionar cada uno. Los relés están previstos para accionar pequeñas potencias, generalmente inferiores a 1 kW, mientras que los contactores pueden accionar grandes potencias (centenares de kilovatios).

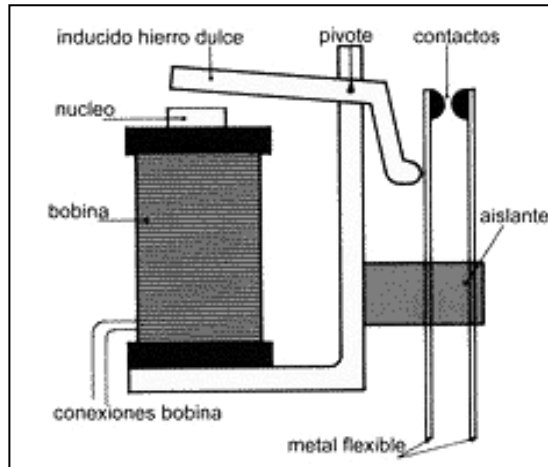
1.2.2.1. Relés

El relé o relevador es un dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

Dado que el relé es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, como un amplificador eléctrico. La gran ventaja de los relés es la completa separación eléctrica entre la corriente de accionamiento, la que circula por la bobina del electroimán, y los circuitos controlados por los contactos, lo que hace que se puedan manejar altos voltajes o elevadas potencias con pequeñas tensiones de control. También ofrecen la posibilidad de control de un dispositivo a distancia mediante el uso de pequeñas señales de control.

En la figura 18 se puede ver el aspecto de un relé de forma esquemática las partes que lo conforman, observar la disposición de los elementos de un relé de un único contacto de trabajo y cómo conmuta al activarse y desactivarse su bobina.

Figura 18. **Relé**



Fuente: Electricidad y electrónica. <http://camilocely.blogspot.com>. 12-07-2009.

Se denominan contactos de trabajo aquellos que se cierran cuando la bobina del relé es alimentada y contactos de reposo a los cerrados en ausencia de alimentación de la misma.

De este modo, los contactos de un relé pueden ser normalmente abiertos, NA o NO, *Normally Open* por sus siglas en inglés, o normalmente cerrados, NC, *Normally Closed*, o de conmutación. Los contactos normalmente abiertos conectan el circuito cuando el relé es activado; el circuito se desconecta cuando el relé está inactivo. Este tipo de contacto es ideal para aplicaciones en las que se requiere conmutar fuentes de poder de alta intensidad para dispositivos remotos. Los contactos normalmente cerrados desconectan el circuito cuando el relé es activado; el circuito se conecta cuando el relé está inactivo. Estos contactos se utilizan para aplicaciones en las que se requiere que el circuito permanezca cerrado hasta que el relé sea activado.

1.2.2.2. Contactor

Podemos definir un contactor como un aparato mecánico de conexión y desconexión eléctrica, accionado por cualquier forma de energía, menos manual, capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito, incluso las de sobrecarga.

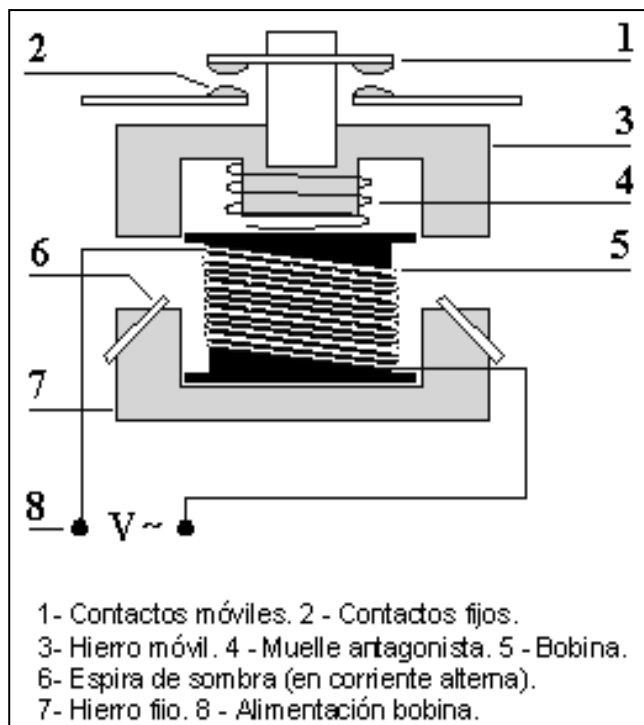
Los contactores corrientemente utilizados en la industria son accionados mediante la energía magnética proporcionada por una bobina. Un contactor accionado por energía magnética, consta de un núcleo magnético y de una bobina capaz de generar un campo magnético suficientemente grande como para vencer la fuerza de los muelles antagonistas que mantienen separada del núcleo una pieza, también magnética, solidaria al dispositivo encargado de accionar los contactos eléctricos.

Así pues, característica importante de un contactor será la tensión a aplicar a la bobina de accionamiento, así como su intensidad o potencia. Según sea el fabricante, se dispondrá de una extensa gama de tensiones de accionamiento, tanto en continua como en alterna siendo las más comúnmente utilizadas, 24Vdc, 48Vdc, 110Vac y 220Vac. La intensidad y potencia de la bobina, naturalmente dependen del tamaño del contactor. El tamaño de un contactor, depende de la intensidad que es capaz de establecer, soportar e interrumpir, así como del número de contactos de que dispone (normalmente cuatro), también depende de la tensión máxima de trabajo que puede soportar. Ésta suele ser de 660 Vac.

Referente a la intensidad nominal de un contactor, sobre catálogo y según el fabricante, se puede observar contactores dentro de una extensa gama, generalmente comprendida entre 5 A y varios cientos de amperios.

Cuando el fabricante establece la corriente característica de un contactor, lo hace para cargas puramente óhmicas y con ella garantiza un determinado número de maniobras, pero si el factor de potencia de la carga que se alimenta a través del contactor es menor que uno, el contactor ve reducida su vida como consecuencia de los efectos destructivos del arco eléctrico, que naturalmente aumentan a medida que disminuye el factor de potencia. En la figura 19 se señalan sus partes.

Figura 19. **Contactor**



Fuente: Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. *Contactos eléctricos y elementos auxiliares de mando*. p. 2.

1.2.2.3. Criterios para la selección de contactor

Para elegir el contactor que más se ajusta a las necesidades, se debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- Tipo de corriente, tensión de alimentación de la bobina y la frecuencia.
- Potencia nominal de la carga.
- Condiciones de servicio: ligera, normal, dura, extrema. Existen maniobras que modifican la corriente de arranque y de corte.
- Si es para el circuito de potencia o de mando y el número de contactos auxiliares que necesita.
- Para trabajos silenciosos o con frecuencias de maniobra muy altas es recomendable el uso de contactores estáticos o de estado sólido.
- Por la categoría de empleo.

1.2.3. Protecciones (interruptor termo magnético)

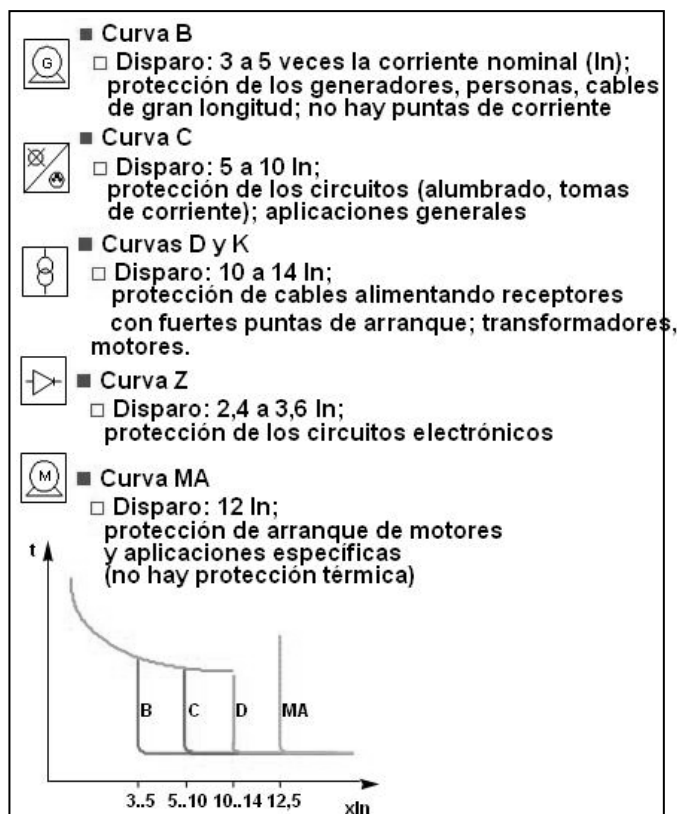
Los motores eléctricos de inducción en corriente alterna, son los dispositivos más usados cotidianamente para la ejecución de trabajos mecánicos. Se encuentran en todo tipo de aplicación: ventilación, refrigeración, aire acondicionado, bombeo, molinos, medios transportadores, entre otros. Las principales causas por las que estos dispositivos sufren daños irreparables, se deben a las alteraciones del suministro eléctrico, exceso de trabajo mecánico asociado y problemas en la instalación eléctrica que alimenta al motor.

Proteger los motores trifásicos, se ha vuelto una necesidad imperativa para los usuarios y/o propietarios de los mismos. Ello debido a las pérdidas económicas que implican la reparación o reposición del motor dañado y las asociadas al servicio que dejaron de prestar estando fuera de operación. La protección de un motor trifásico debe contemplar problemas asociados a voltajes y al consumo de corriente. Para ello, se requieren de dispositivos que estén en capacidad de supervisar los valores de voltaje y de las corrientes con que opera el motor.

Es sumamente utilizado para este tipo de protecciones el interruptor termomagnético, que es un dispositivo capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando ésta sobrepasa ciertos valores máximos. Su funcionamiento se basa en dos de los efectos producidos por la circulación de corriente eléctrica en un circuito: el magnético y el térmico (efecto Joule). El dispositivo consta, por tanto, de dos partes, un electroimán y una lámina bimetálica, conectadas en serie y por las que circula la corriente que va hacia la carga.

Ambos dispositivos se complementan en su acción de protección, el magnético para los cortocircuitos y el térmico para las sobrecargas. Además de esta desconexión automática, el aparato está provisto de una palanca que permite la desconexión manual de la corriente y el rearme del dispositivo automático cuando se ha producido una desconexión. No obstante, este rearme no es posible si persisten las condiciones de sobrecarga o cortocircuito. Las características que definen un interruptor termomagnético son el amperaje, el número de polos, el poder de corte y el tipo de curva de disparo, ver figura 20.

Figura 20. Interruptor termomagnético, curva de respuesta

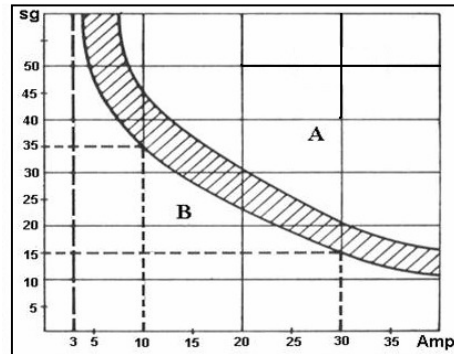


Fuente: Disección de un interruptor termomagnético <http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=138>. 02-06-2009.

1.2.3.1. Relé térmico de sobrecarga

En este tipo de relé la corriente pasa por un conductor de tira bimetálica, calentándola en función de I^2 y el tiempo, al calentarse el bimetálico se encorva y empuja una palanquita del mecanismo de disparo, con lo que los contactos se abren rápidamente por la acción de un resorte. Para ponerlo nuevamente en funcionamiento se baja la palanca y luego se vuelve a subir para restablecer el circuito. En la figura 21 se muestra la curva característica I^2t de este relé.

Figura 21. **Relé térmico, curva de respuesta**

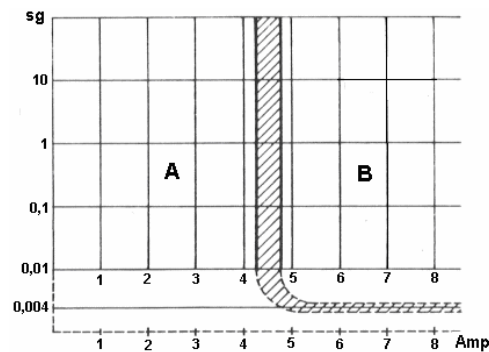


Fuente: GENIUS. *Manual para protección de motores.* p. 23.

1.2.3.2. Relé magnético de cortocircuito

El disparo magnético se utiliza para la protección más rápida por cortocircuito. Consiste en una bobina conectada en serie con la corriente (relé), al sobrepasar cierto valor, atrae la armadura y abre el circuito. El tiempo de respuesta es casi instantáneo. La figura 22 muestra su curva característica.

Figura 22. **Relé magnético, curva de respuesta**



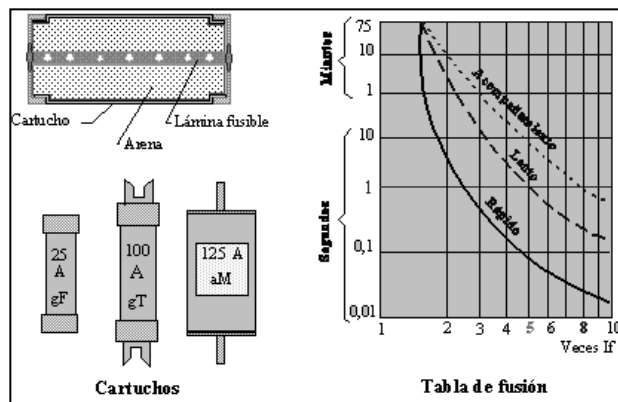
Fuente: GENIUS. *Manual para protección de motores.* p. 21.

1.2.3.3. Fusibles

Los fusibles son pequeños dispositivos que permiten el paso constante de la corriente eléctrica hasta que ésta supera el valor máximo permitido. Cuando aquello sucede, entonces el fusible, inmediatamente, cortará el paso de la corriente eléctrica a fin de evitar algún tipo de accidente, protegiendo los aparatos eléctricos de quemarse o estropearse.

Por lo general, los fusibles están instalados entre la fuente de alimentación eléctrica y el circuito que se quiere electrificar, y consta de un hilo que, a medida que la corriente eléctrica pasa, se calienta. Por lo tanto, cuando uno de estos dispositivos se quema, entonces significa que alguna parte del aparato ha consumido más electricidad de la necesaria, siendo necesaria una revisión completa de éste y una reposición del fusible quemado por uno de las mismas características. La figura 23 muestra las curvas características.

Figura 23. Fusible y curvas de respuesta



Fuente: Fusibles. <http://usuarios.multimania.es/jota235/FUSIBLES.htm>. 24-06-2009.

1.2.4. Compresores (motor asíncrono)

Antes de empezar con la definición de que es un compresor y cómo trabaja normalmente, es conveniente definir qué es un motor asíncrono y cómo es que éste opera, sin entrar a procedimientos matemáticos, para entender el comportamiento del compresor, el cual será descrito a fondo en capítulos posteriores.

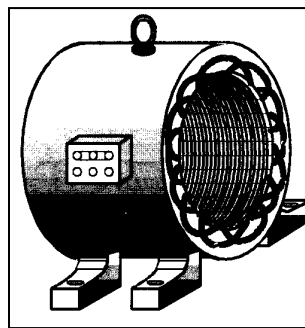
1.2.4.1. Motor asíncrono

El motor asíncrono es una máquina eléctrica cuyo principal propósito es la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica, por medio de rotación del eje.

Como todas las máquinas eléctricas, las asíncronas o de inducción constan de una parte fija o estator y una parte móvil o rotor, separadas por un pequeño espacio de aire denominado entrehierro. Tanto el estator como el rotor, o el entrehierro son parte de un circuito magnético atravesado por el flujo común de la máquina y juegan por tanto, un papel activo en la conversión de energía. Es preciso diferenciar estas partes activas de otras meramente estructurales o de protección como la carcasa exterior, los cojinetes o rodamientos y el eje, o que juegan un papel auxiliar como el ventilador o sistema de refrigeración.

El estator está formado por un núcleo de chapas magnéticas aisladas y aisladas entre sí, que aloja un devanado trifásico en las ranuras situadas en su superficie interior. Estas ranuras están uniformemente distribuidas a lo largo de la periferia del estator de forma que la distribución de conductores sea idéntica para las tres fases del estator, con la única diferencia de que los conductores que ocupan posiciones homólogas en cada una de las fases están desplazados 120° eléctricos entre sí, ver figura 24.

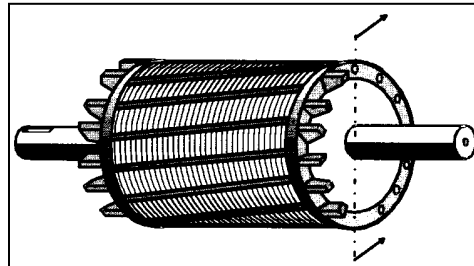
Figura 24. **Estator**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p. 261.

El rotor se forma también a base de chapas magnéticas pero tiene la forma de un cilindro con las ranuras que alojan el devanado situadas en su superficie exterior y distribuida también de manera uniforme. En la mayoría de los casos las ranuras del rotor están inclinadas para mejorar la forma de onda de la fmm producida. Existen dos ejecuciones para los devanados del rotor: de jaula de ardilla y bobinado o de anillos. El primer caso se muestra en la figura 25, los huecos de las ranuras se rellenan con barras de aluminio fundido que se unen en ambos extremos del rotor mediante unos anillos de cortocircuito igualmente conductores, adoptando la forma de jaula de ardilla, por eso su denominación.

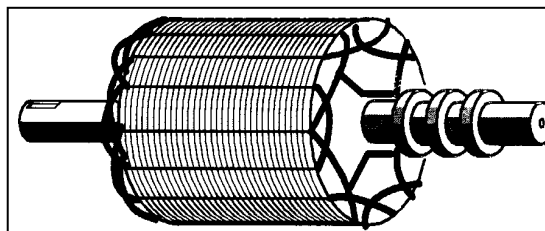
Figura 25. **Estructura del devanado jaula de aridilla**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p. 262.

El rotor bobinado o de anillo, figura 26, está formado por un devanado trifásico similar al estatórico. Las tres fases se suelen conectar en estrella y los otros tres extremos libres se conectan a sendos anillos conductores aislados entre si y respecto al eje, sobre los que hacen contacto unas escobillas de grafito. Este tipo de motores es mucho más caro que los motores de jaula, es algo más voluminoso y pesado y se requiere mayor mantenimiento, inconvenientes que pueden ser compensados por sus ventajas en aplicaciones a frecuencias de alimentación constante. Sin embargo, todo ello se puede conseguir con motores de jaula funcionando con variadores de frecuencia.

Figura 26. **Rotor bobinado o de anillos**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p. 262.

1.2.4.2. Características del motor

Además del estator y rotor previamente descritos, un motor trifásico consiste básicamente en:

- **Carcasa:** en su interior se aloja el circuito magnético (estator)
- **Caja de bornes:** los tres grupos o fases tienen su principio y final en la caja de bornes. A los principios de fase se les designa con las letras U1-V1-W1 y a los finales con las letras U2-V2-W2.
- **Tapas:** el rotor para girar libremente se apoya en dos tapas que cierran a su vez la carcasa. El tipo de cierre se ajusta a normas, y según sea local o recinto donde trabaja el motor, el cierre deberá ser más o menos estanco.
- **Refrigeración:** para disipar el calor producido por el circuito eléctrico y magnético, la carcasa tiene una configuración especial, para desprenderse mejor del calor. La ventilación puede ser natural o forzada.
- **Placa de características:** sobre el mismo motor (carcasa) se colocan en un lugar visible una placa que lleva impresa las características principales del motor, como son:
 - Marca del fabricante
 - Número de serie de fabricación
 - Tensión o tensiones de trabajo
 - Potencia del motor
 - Velocidad a la que se obtiene la potencia señalada
 - Factor de potencia
 - Clase de aislamiento

1.2.4.3. Métodos de arranque para el motor asíncrono

- Arranque Directo: un motor arranca de forma directa, cuando se aplica a sus bornes, de forma directa, la tensión a que se debe trabajar. Así por ejemplo, si un motor con bobinado de 220/380V se le aplica a sus bornes 220V, el motor habrá recibido directamente la tensión de servicio. Suponiendo que el motor arranca en carga, el bobinado tiende a absorber una intensidad de corriente muy superior a la que señala su placa de características, llegando hasta 8 veces la intensidad nominal ($8I_n$).

Ventajas

- Par de arranque elevado, hasta 1,5 veces el nominal
- Mínima cantidad de elementos utilizados para el arranque
- Arranque estrella – delta: la finalidad de este arranque es la de reducir la intensidad absorbida por el motor durante el período de arranque, en detrimento de su par. Esta forma de arranque se utiliza en motores que inician su marcha con demanda de par resistente inferior al nominal. Se obtiene un par del 33% del par de arranque directo y una intensidad de corriente reducida en un denominador de $\sqrt{3}$.

Ventajas:

- Disminuye la tensión inicial de arranque, necesitando una baja tensión en los bornes del motor a frecuencia nominal.

- Arranque estrella – resistencia – delta: otra forma de reducir la intensidad en el período de arranque es esta variante de la conexión estrella-delta y consiste en intercalar entre las conexiones de estrella y delta una resistencia. La corriente absorbida en el período de arranque puede oscilar entre 1,3 y 2,6 veces la corriente nominal y el par entre 0,2 y 0,5 el par motor. Este tipo de arranque tiene el inconveniente de que al pasar de un punto a otro durante la fase de arranque hay un período donde falta corriente al motor, lo que repercute en el arranque.

Ventajas:

- Mayor reducción de corriente de arranque que el de estrella – delta
 - Arranque en tres escalones
- Arranque con resistencias estáticas: esta forma de arranque de motores trifásicos se utiliza para la puesta en marcha de motores de mediana y gran potencia, cuyo par resistente en el arranque es bajo. Duración del arranque entre 7 a 12 segundos. La intensidad de arranque puede llegar hasta 4,5 I_n.

Ventajas:

- Al pasar de un punto de resistencia a otro, no hay cortes de la corriente que alimentan al motor.
- El par de arranque crece más rápidamente con la velocidad.
- Las puntas de intensidad también son más reducidas.
- Útiles para el arranque de máquinas con fuerte inercia.

- Arranque con resistencias rotóricas: para este tipo de arranque es necesario contar con un tipo de motor con rotor bobinado. Esta forma de arranque con uno o dos sentidos de giro se utiliza cuando el motor con rotor bobinado acciona máquinas cuyo par de arranque inicial es bajo. El estator se alimenta siempre a plena carga. La tensión de línea se suministra directamente al bobinado estatórico.

Ventajas:

- Posibilidad de elegir el par de arranque
- Posibilidad de elegir el número de escalones en el arranque
- Arranque por autotransformador: esta forma de arranque se utiliza para la puesta en marcha de motores trifásicos con rotor en corto circuito, que accionan máquinas cuyo par resistente en el arranque es bajo.

Ventajas:

- Posibilidad de elegir el valor del par de arranque. Reducción, en la misma proporción, del par y de la corriente de arranque.
- Arranque en 2 ó 3 tiempos.
- Paso de uno a otro punto de arranque sin corte.
- Arrancador estático: consiste básicamente en un convertidor estático, alterna-alterna, generalmente transistores, que permiten el arranque de motores de ca con aplicaciones progresivas de tensión con la consiguiente limitación de corriente o par de arranque.

El arrancador estático puede dividirse en dos partes bien concretas y definidas, como son el circuito de potencia, tiristores y el circuito de maniobra y regulación de los tiristores. Al poner en servicio el equipo, los tiristores dejan pasar la corriente que alimenta al motor de acuerdo con la programación realizada sobre el circuito de maniobra, que irá aumentando progresivamente hasta alcanzar los valores nominales de la tensión de servicio.

Ventajas:

- El arranque de un motor con arrancador estático no se inicia desde cero, sino que se parte de un valor mínimo de aproximadamente el 33% del valor nominal o de otro mayor, según el tipo de motor y de arranque de que se trate.
- No tiene elementos móviles, ni contactos o contactores.
- Permite arranques suaves, sin transiciones o saltos.
- Limita la corriente de arranque.
- Ahorra energía cuando el motor está parcialmente cargado, mejorando el factor de potencia.
- Mejora el rendimiento del motor.
- El equipo no tiene límites en cuanto al número de arranques, como suele suceder en la vida de los contactores.

Tabla IV. **Comparación de arranques**

Tipo de arranque	% de I_n en el arranque	Intensidad de arranque	% par respecto al arranque directo	Escalones de arranque	No. de hilos al motor	Cortes de corriente en el arranque
Directo	100	$6 I_n$	100	1	3	No
Estrella-Delta	33	$1,65 I_n$	33	2	6	Si
Resistencias estáticas	58 – 70	$3 - 3,5 I_n$	33 -49	3 o 2	3	No
Resistencias rotóricas	65	$3,25 I_n$	48	2	6	No
Autotransformador	30 a 64	$1,5 a 3,2 I_n$	30 a 64	4 a 2	3	No
Arrancadores estáticos	80	$4,5 I_n$	64	progresivo	3	No

Fuente: ROLDAN VILORIA, José. *Motores eléctricos automatismos de control*. p. 75

1.2.4.4. **Compresor**

Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, como son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

1.2.5. Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como *drivers* de frecuencia ajustable (AFD), *drivers* de CA, *microdrivers* o inversores. Dado que el voltaje es variado a la vez que la frecuencia, a veces son llamados *drivers* VVVF (variador de voltaje, variador de frecuencia).

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:

$$\text{RPM} = 120 * f / p$$

Donde:

RPM = revoluciones por minuto

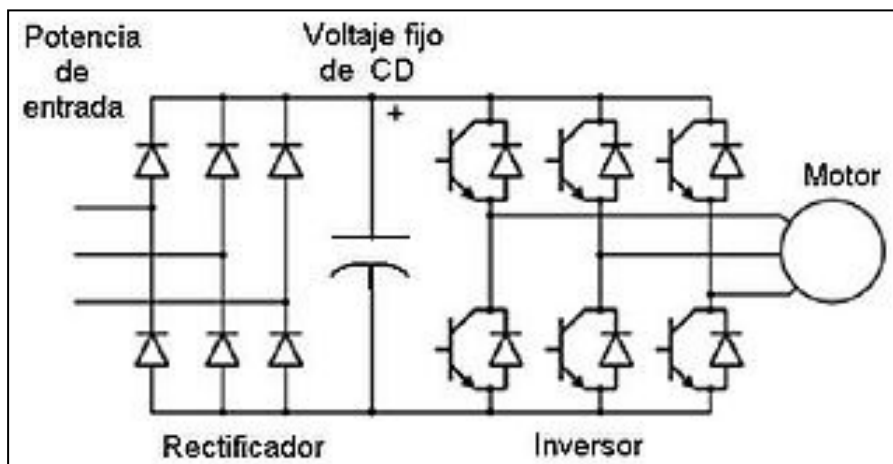
f = frecuencia de suministro CA (Hercio)

p = número de polos (adimensional)

El controlador de dispositivo de variación de frecuencia está formado por dispositivos de conversión electrónicos de estado sólido. El diseño habitual, primero convierte la energía de entrada CA en CC usando un puente rectificador. La energía intermedia CC es convertida en una señal cuasi-senoidal de CA usando un circuito inversor conmutado.

El rectificador es usualmente un puente trifásico de diodos, figura 27, pero también se usan rectificadores controlados. Debido a que la energía es convertida en continua, muchas unidades aceptan entradas, tanto monofásicas como trifásicas, (actuando como un convertidor de fase, un variador de velocidad).

Figura 27. **Diagrama de variador de frecuencia**



Fuente: SANZ FEÍTO, Javier. *Máquinas eléctricas*. p. 276.

1.2.6. Factor de potencia

El factor de potencia de un circuito de corriente alterna puede definirse como la relación entre la potencia activa, P , y la potencia aparente, S , si las corrientes y tensiones son ondas perfectamente senoidales.

Si las corrientes y tensiones son ondas perfectamente senoidales, el factor de potencia será igual a $\cos\phi$ o como el coseno del ángulo que forman los fasores de la corriente y la tensión, designándose en este caso como $\cos\phi$, siendo ϕ el valor de dicho ángulo. Por lo que,

$$\text{Cos}\phi = P/S$$

Donde:

$\cos\phi$ = factor de potencia

P = potencia activa en W

S = potencia aparente en VA

Ignorando la matemática fundamental del fenómeno en la práctica, el punto es que para un circuito comercial típico alto en inductancia, la planta debe suplir algo de potencia que no hace trabajo y el cual no se mide en el vatímetro normal, privando así a la compañía de ganancias.

Si, por ejemplo los cálculos de los voltios y amperios medidos dan 2 000 vatios, pero el aparato sobre la línea realmente muestra un consumo de 1600 vatios el factor de potencia es de: f.p. = $1600/2000 = 0,8$. Esto significa que el 80% de la potencia suplida está haciendo trabajo medible. El restante 20% es corriente de magnetización, la cual hace posible el funcionamiento de los aparatos de inducción que no hacen trabajo en sí mismos, y por consiguiente éste no es normalmente registrado. Los aparatos de inducción, tales como: motores y lámparas, nunca tienen un factor de potencia del 100%. Y aunque es una desventaja utilizar estos aparatos, son necesarios en la industria.

1.3. Conceptos de teoría de control

La teoría de control es un campo interdisciplinario de la ingeniería y las matemáticas, que trata con el comportamiento de sistemas dinámicos. Un controlador manipula la entrada al sistema para obtener el efecto deseado en la salida del sistema.

1.3.1. Lazo abierto

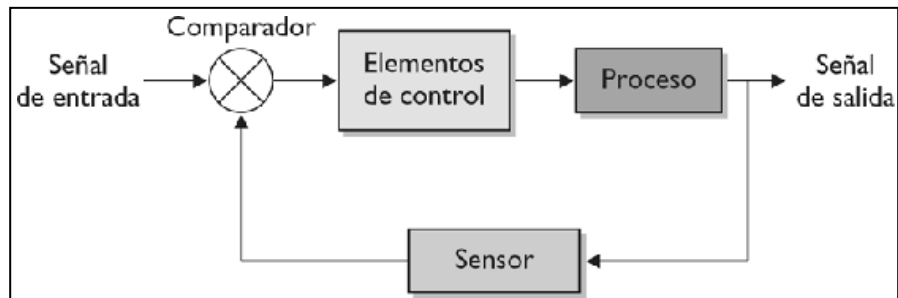
Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual no existe realimentación, del proceso al controlador. Algunos ejemplos de este tipo de control están dados en los hornos, lavadoras, licuadoras, batidoras, etc.

Su principal ventaja consiste en su facilidad para implementar, además son económicos, simples, y de fácil mantenimiento. Sus desventajas consisten en que no son exactos, no corrigen los errores que se presentan, su desempeño depende de la calibración inicial.

1.3.2. Lazo cerrado

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en donde la señal de salida o parte de la señal de salida es realimentada y tomada como una señal de entrada al controlador, generando un error, el cual debe ser corregido. Este es el caso común utilizado en el campo del control de procesos industriales. Este tipo de control es conocido comúnmente como retroalimentación (*Feedback*) y pretende corregir las perturbaciones del proceso. El diagrama de proceso se muestra en la figura 28.

Figura 28. **Lazo cerrado**



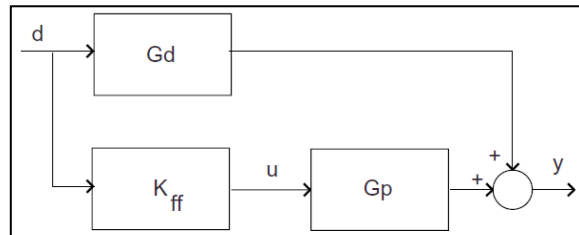
Fuente: Sistemas de control. <http://www.kalipedia.com/informatica/tema/sistemas-control-lazo-cerrado.html>. 30-07-2009.

1.3.3. Pre alimentación (*Feedforward*)

Consiste en la posibilidad de medir las perturbaciones que ingresan al proceso, de manera tal que el control actúe sobre él aun antes de que tales perturbaciones alejen al proceso del punto de ajuste deseado.

Para esto la perturbación medida d se alimenta a un controlador denominado *feedforward* k_{ff} (o de pre alimentación) el cual genera un acción de control u para tratar de mantener la variable controlada y cerca del punto de ajuste. La figura 29 se muestra el bloque de esquemas de control, donde G_p representa la función de transferencia del control y G_d la función de la perturbación.

Figura 29. **Control *feedforward***



Fuente: Sistemas de control. <http://www.kalipedia.com/informatica/tema/sistemas-control-lazo-cerrado.html>. 30-07-2009.

1.3.4. **Control todo o nada**

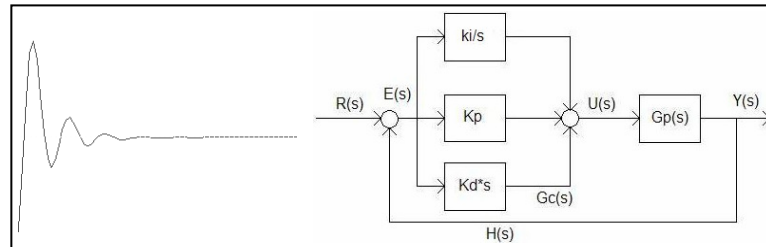
También llamado *on-off* o abierto-cerrado, es la forma más simple de control por retroalimentación, es dos posiciones, en el que el elemento final de control sólo ocupa una de las dos posiciones.

1.3.5. **Control PID**

Un proporcional integral derivativo (PID) es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso, figura 29. Es el más completo y complejo, tiene una respuesta más rápida y estable siempre que esté bien sintonizado. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos:

- El control proporcional que actúa sobre el tamaño del error
- El control integral que rige el tiempo para corregir el error
- El control derivativo que le brinda la rapidez a la actuación

Figura 30. **Control PID**



Fuente: MENDIBURU, Henry. *Automatización medioambiental*. p. 15

La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control, como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador, por ejemplo.

Ajustando estas tres variables en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar. La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de respuesta del control ante un error, el grado al cual el controlador llega al punto de ajuste, y el grado de oscilación del sistema.

Algunas aplicaciones pueden sólo requerir de uno o dos modos de los que provee este sistema de control. Un controlador PID puede ser llamado también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control.

1.3.5.1. Variable controlada

Es el flujo, el nivel, la temperatura, presión, etc., es el proceso que se desea controlar, también llamada en algunos casos variable de proceso (PV).

1.3.5.2. Setpoint

Punto de consigna o punto de ajuste, este es el valor al cual se desea que el proceso o la variable a controlar se estabilicen.

1.3.5.3. Error

Es la diferencia entre la variable controlada (señal de salida) y el punto de consigna (señal de referencia).

1.3.5.4. Feedback

Se refiere a la proporción de la señal de salida del sistema que se dirige de nuevo a la entrada. Esto es de uso frecuente para controlar el comportamiento dinámico del sistema.

1.3.5.5. PID Output

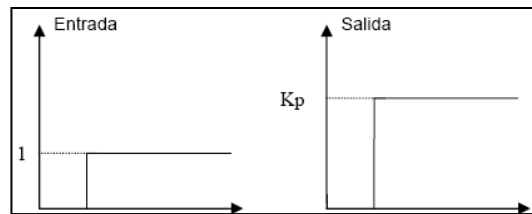
Es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error.

1.3.5.6. Parámetros del control PID

- Controlador proporcional (P): es un control que se basa en la ganancia aplicada al sistema, se basa en el principio de que la respuesta del controlador deber ser proporcional a la magnitud del error, figura 31.

No corrige ni elimina perturbaciones, puede atenuar o aumentar la señal de error. Se representa a través del parámetro K_p y define la fuerza o potencia con que el controlador reacciona frente a un error.

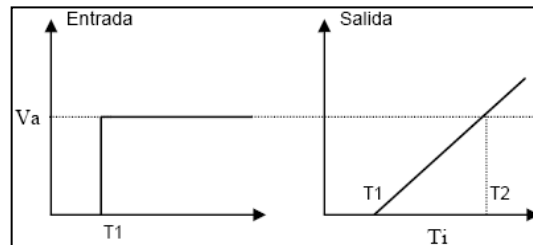
Figura 31. **Control proporcional**



Fuente: MENDIBURU, Henry. *Automatización medioambiental*. p. 18.

- Controlador Integral (I): tiene como propósito eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El error es integrado lo cual tiene como función promediarlo, figura 32, luego de multiplicarlo por la constante integral K_i se le suma a la parte proporcional. También es llamado acción de *reset* porque automáticamente reinicia el valor del error a cero en el tiempo.

Figura 32. **Control integral**

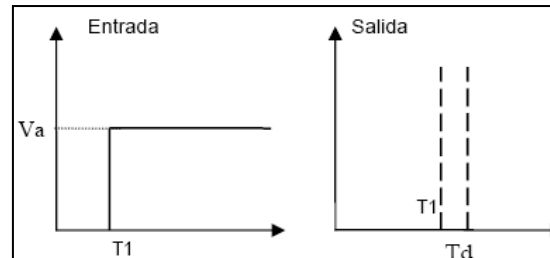


Fuente: MENDIBURU, Henry. *Automatización medioambiental*. p. 18.

- Controlador Derivativo (D): la acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio absoluto en el error (si el error es constante solo actuará la constante proporcional e integral). Su función es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad con que se produce; de esta manera evita que siga creciendo.

Esto se logra derivando con respecto del tiempo el error, figura 33, multiplicándolo por la constante derivativa K_d y sumádoselo a la parte proporcional e integral. Este tipo de control nunca es utilizado solo, debido a que los cambios que provoca son muy grandes a la salida del controlador, ya sea error positivo o negativo. El tiempo óptimo de la acción derivativa es el que retorna a la variable controlada al punto de consigna con las mínimas oscilaciones.

Figura 33. **Control derivativo**



Fuente: MENDIBURU, Henry. *Automatización medioambiental*. p. 19.

- Significado de las constantes: el control PID sigue la función de transferencia:

$$MV(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right)$$

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Donde $e(t)$ es el error y cada parámetro del control PID significa lo siguiente:

- K_p : valor de ganancia del controlador o el porcentaje de banda proporcional. La relación de ganancia proporcional entre la variable de control y el error, depende del ancho de banda en el cual está trabajando el control. La banda proporcional (PB) es un porcentaje del rango completo de la variable del proceso. Así:

$$PB = \frac{PV(\max) - PV(\min)}{PV(\maxrang) - PV(\minrang)}, \quad Kp = \frac{1}{PB}$$

La ganancia Kp indica qué tan sensible es el controlador proporcional al error.

- Ki: velocidad con la que se repite la acción proporcional y está dada por la ecuación:

$$Ki = \frac{\% \text{de Cambio de CV por sec.}}{\% \text{error sobre rango completo}}, \quad T = \frac{1}{Ki}$$

El valor introducido directamente al controlador es el inverso de la ganancia integral Ti, de tal manera que es introducido en segundos.

- Kd: duplica la acción proporcional sin que el error se duplique. Es el lapso de tiempo durante el cual la acción proporcional será 2 veces el error y luego desaparecerá. $Kd = Td$.

1.3.5.7. Ajuste de lazos

Hay varios métodos para ajustar un lazo de PID. El método más efectivo generalmente requiere del desarrollo de alguna forma del modelo del proceso, luego elegir Kp, Ti y Td basándose en los parámetros del modelo dinámico. Los métodos de ajuste manual pueden ser muy ineficientes. La elección de un método dependerá de si el lazo puede ser desconectado para ajustarlo, y del tiempo de respuesta del sistema.

Si el sistema puede desconectarse, el mejor método de ajuste a menudo es el de ajustar la entrada, midiendo la salida en función del tiempo, y usando esta respuesta para determinar los parámetros de control. Ahora se describe cómo realizar un ajuste manual.

En el modo manual, si el sistema debe mantenerse *online*, un método de ajuste consiste en establecer primero los valores de T_i y T_d a cero, incrementar K_p hasta que la salida del lazo oscile. Luego establecer K_p aproximadamente a la mitad del valor configurado previamente. Después incrementar T_i hasta que el proceso se ajuste en el tiempo requerido (aunque subir mucho T_i puede causar inestabilidad). Finalmente, incrementar T_d , si se necesita, hasta que el lazo sea lo suficientemente rápido para alcanzar su referencia tras una variación brusca de la carga.

1.3.5.8. Influencia de las constantes del control PID sobre la variable controlada

Básicamente, y en resumen el controlador proporcional tendrá el efecto de reducir el tiempo de crecimiento y reducirá (pero no eliminará) el error de estado estable. El control integral tendrá el efecto de eliminar el estado estable, pero sin embargo podría empeorar la respuesta transitoria. Un control derivativo tendrá el efecto de aumentar la estabilidad en el sistema al disminuir el sobre pico, mejorando la respuesta transitoria. Se resumen los efectos que tendrán cada uno de los parámetros K_p , K_i , K_d cuando se incrementan independientemente en la tabla V.

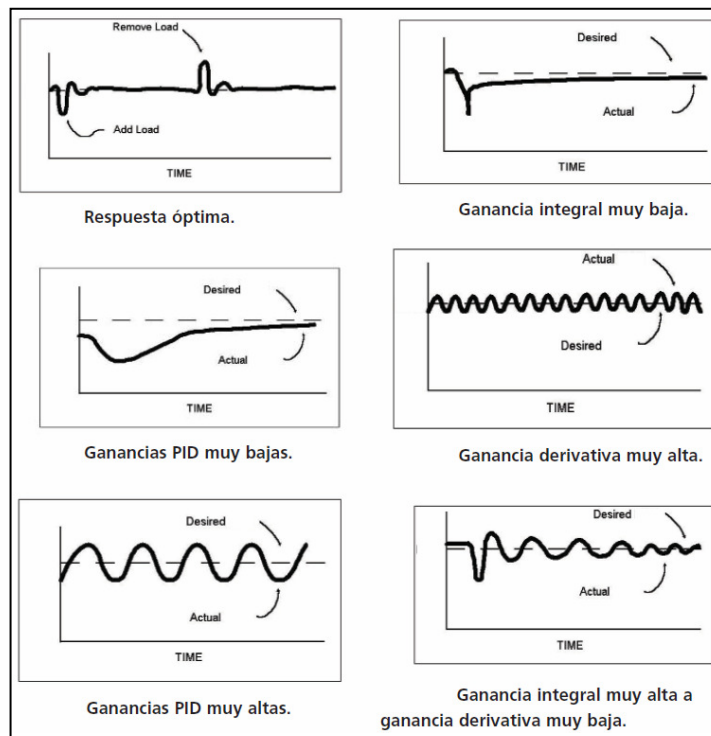
Gráficamente se muestra cómo influyen los cambios de los parámetros sobre la respuesta del sistema en la figura 34. La línea punteada muestra el *setpoint* y la línea continua la señal de salida.

Tabla V. **Efecto del incremento de los parámetros del control PID**

Parámetro	Tiempo de crecimiento	Sobre pico	Tiempo de establecimiento	Error de estado estable	Estabilidad
Kp	Disminuye	Aumenta	Poco cambio	Disminuye	Disminuye
Ki	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Elimina	Disminuye
Kd	Poco cambio	Disminuye	Disminuye	Poco cambio	Mejora con un Kd, pequeño

Fuente: Regulación de procesos. http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_quimica/regulaciondeprocesos. 05-10-2009.

Figura 34. **Efecto de las constantes en el control PID**



Fuente: Regulación de procesos http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_quimica/regulaciondeprocesos. 05-10-2009.

1.4. Sistema SCADA

SCADA proviene de las siglas *Supervisory Control And Data Acquisition* (Adquisición de Datos y Supervisión de Control). El SCADA se encarga del control y supervisión de un proceso y lo hace por medio de una estación central generalmente una PC llamada estación maestra o unidad terminal maestra (MTU); y una o varias unidades cercanas remotas (RTU), por medio de las cuales se hace el control, adquisición de datos hacia y desde el campo.

1.4.1. Funciones del sistema SCADA

Dentro de las funciones básicas realizadas por el sistema SCADA están las siguientes:

- Adquisición de datos: recolectar, procesar, almacenar y mostrar la información recibida en forma continua desde los equipos de campo.
- Supervisión: el operador podrá observar desde el monitor la evolución de las variables de control, como cambios que se produzcan en la operación diaria de la planta.
- Control: el operador puede ejecutar acciones de control. Podrá modificar la evolución del proceso en situaciones irregulares que se generen.
- Generación de reportes: de los datos adquiridos se pueden generar representaciones gráficas de los datos, predicciones, control estadístico, gestión de la producción, gestión administrativa y financiera, entre otros.

1.4.2. Requisitos del sistema SCADA

Un sistema SCADA debe ser un sistema de arquitectura abierta, es decir capaz de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa. Debe comunicarse con total facilidad y de forma transparente al usuario con el equipo de la planta y con el resto de la empresa. Los sistemas SCADA deben tener programas de *software* sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de *hardware*, y fáciles de utilizar, con interfaces amigables con el usuario.

1.4.3. Unidades locales y remotas

La unidad terminal maestra es el computador principal del sistema el cual supervisa y recoge la información del resto de las subestaciones; soporta una interfaz hombre máquina. El sistema SCADA más sencillo es el compuesto por un único computador, el cual es la unidad terminal maestra (MTU) que supervisa toda la estación.

Una unidad terminal remota es un dispositivo instalado en una localidad remota del sistema. Está encargado de recopilar datos para luego ser transmitidos hacia la unidad terminal maestra. Esta unidad está provista de canales de entrada para detección o medición de las variables de un proceso y de canales de salida para control o activación de alarmas y un puerto de comunicaciones. Una tendencia actual es la de dotar al controlador lógico programable (PLC) la capacidad de funcionar como unidad terminal remota.

1.4.4. Componentes de *hardware*

- Red de comunicación: el sistema de comunicación es el encargado de la transferencia de información entre la planta y la arquitectura *hardware* que soporta el SCADA. El tipo de comunicación puede variar según las necesidades del sistema y del programa del *software* escogido para implementar el sistema SCADA, ya que no todos los programas de *software* así como los instrumentos de campo pueden trabajar con el mismo medio de comunicación.
- Instrumentación de campo: los instrumentos de campo están constituidos por todos aquellos dispositivos que permiten realizar la automatización o control del sistema (PLCs, controladores de procesos industriales, y actuadores en general) son los que se encargan de la captación de información del sistema.

1.4.5. Componentes de *software*

- Configuración: permite al usuario definir el entorno de trabajo de su aplicación, dentro del módulo de configuración el usuario define las pantallas gráficas o de texto que va a utilizar.
- Interfaz gráfico del operador: permite al operador determinar el estado de los dispositivos de campo (prendido/apagado) que están presentes en los procesos industriales proporcionando al operador las funciones de control y supervisión de la planta.

- Módulo de proceso: este módulo ejecuta las acciones de mando preprogramadas a partir de valores actuales de las variables de campo leídas.
- Gestión y archivo de datos: se encarga del almacenamiento y proceso de los datos, según formatos inteligibles para periféricos: *hardware* (impresoras, registradores) o *software* (bases de datos, hojas de cálculo).

1.4.6. Interfaz humano-máquina (HMI)

Las siglas HMI es la abreviación en inglés de interfaz hombre máquina. Los sistemas HMI podemos describirlos como una ventana de un proceso. Esta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador, bien pueden ser pantallas táctiles o computadoras industriales, o en una computadora personal. Las señales del proceso son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida en la computadora, PLC's, RTU o *drivers*. Todos estos dispositivos deben tener una comunicación compatible con el HMI.

2. OPERACIÓN DE UN CUARTO FRÍO

2.1. Cuartos fríos

El producto agrícola (frutas y hortalizas) es en su gran mayoría perecedero. Después de la cosecha sigue un proceso llamado comúnmente respiración durante el cual los azúcares se combinan con el oxígeno del aire produciendo anhídrido carbónico y agua, despidiendo calor hasta llegar a la completa maduración del fruto. Al mismo tiempo, los microorganismos que están presentes en los frutos a temperatura ambiente, se alimentan y reproducen a un ritmo exponencial, a medida que se acerca la maduración, destruyendo los tejidos. Se comprobó que si se mantiene el producto cosechado a temperatura menor que la del ambiente, se consigue alargar el período de maduración un tiempo que varía desde 3-4 días hasta 6-8 meses, de acuerdo a la especie y a la variedad.

La carne de animales (bovinos, porcinos, peces, aves) después de sacrificados no siguen ningún proceso natural salvo el ataque de microorganismos que, a temperatura ambiente, atacan los tejidos. La carne deja de ser comestible en 2-3 días. También en este caso, manteniendo las carnes a bajas temperaturas, el proceso de deterioro se puede modificar y así consumir la carne varios meses después del sacrificio.

La posibilidad de ofrecer los frutos y las carnes durante un período más largo tiene una importancia alimenticia y económica muy grande. Para ello se almacenan los productos en cuartos frigoríficos a temperatura apropiada que permite ofrecerlo al consumidor mucho tiempo después de la cosecha. Hay tablas que indican a qué temperatura y humedad relativa y cuál es el tiempo máximo que es posible mantener cada uno antes de enviarlos al mercado.

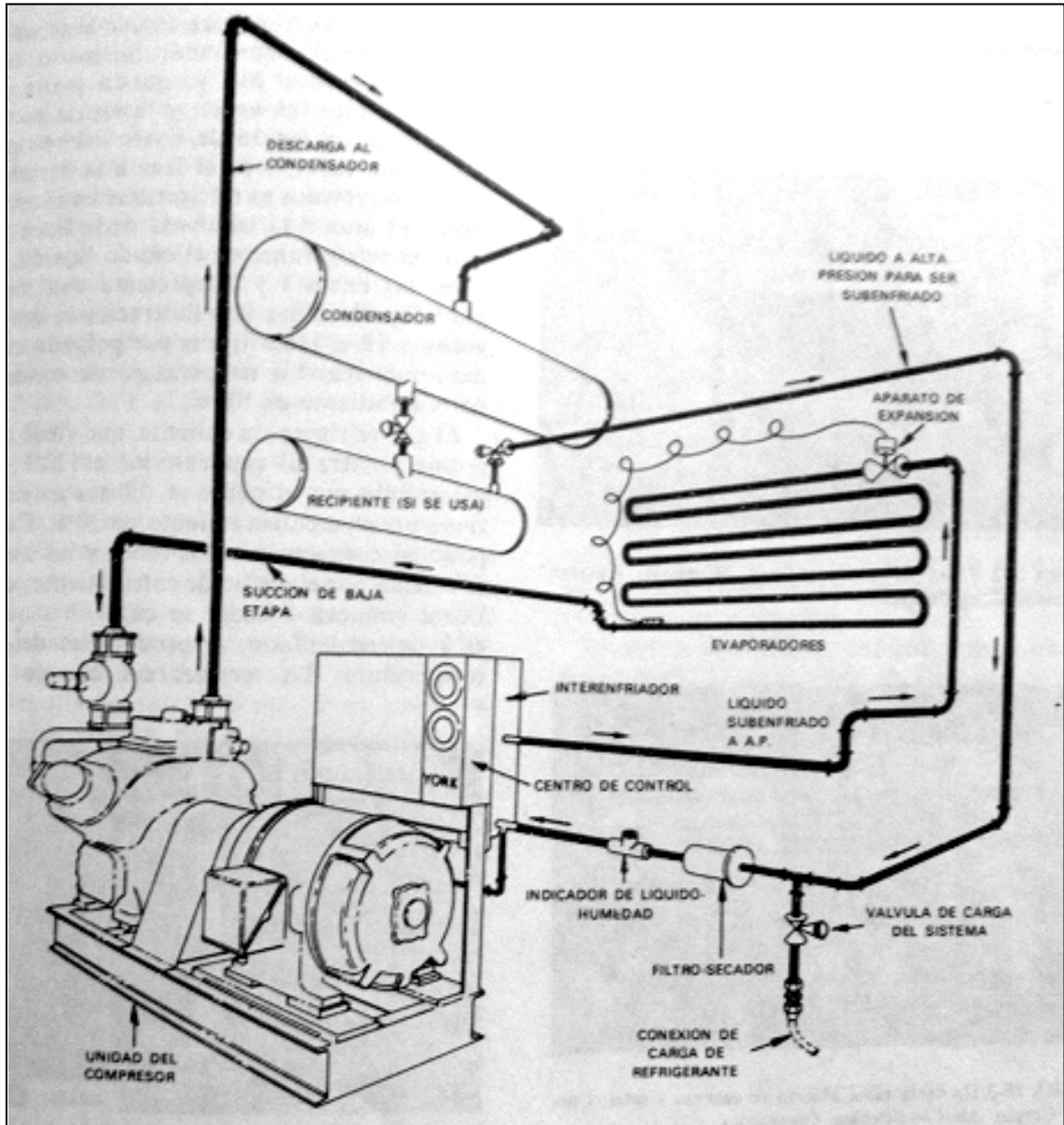
2.1.1. Definición

Es la instalación física que se utiliza para almacenar alimentos perecederos y que necesitan temperaturas de refrigeración y/o congelamiento.

2.1.2. Elementos que lo componen

Un circuito simple de refrigeración se construye como se muestra en la figura 35. Después de esta se describe uno a uno los elementos que lo conforman, para con esto poder comprender el funcionamiento del conjunto final:

Figura 35. Elementos de un cuarto frío



Fuente: AIR-CONDITIONING AND REFRIGERATION INSTITUTE. *Refrigeración y aire acondicionado*. p. 215.

2.1.2.1. Evaporador

Se conoce por evaporador al intercambiador de calor que genera la transferencia de energía térmica contenida en el medio ambiente hacia un gas refrigerante a baja temperatura y en proceso de evaporación. Este medio puede ser aire o agua. En la refrigeración por compresión el evaporador opera como intercambiador de calor, por cuyo interior fluye el refrigerante el cual cambia su estado de líquido a vapor. Este cambio de estado permite absorber el calor sensible contenido alrededor del evaporador y de esta manera el gas, al abandonar el evaporador lo hace con una energía interna notablemente superior, cumpliéndose así el fenómeno de refrigeración.

El flujo de refrigerante en estado líquido es controlado por un dispositivo o válvula de expansión la cual genera una abrupta caída de presión en la entrada del evaporador. En los sistemas de expansión directa, esta válvula despiden una fina mezcla de líquido y vapor a baja presión y temperatura. Debido a las propiedades termodinámicas de los gases refrigerantes, esta caída de presión está asociada a un cambio de estado y, lo que es más importante aún, al descenso en la temperatura del mismo.

De esta manera, el evaporador absorbe el calor sensible del medio a refrigerar transformándolo en calor latente el cual queda incorporado al refrigerante en estado de vapor. Este calor latente será disipado en otro intercambiador de calor del sistema de refrigeración por compresión: el condensador, dentro del cual se genera el cambio de estado inverso, es decir, de vapor a líquido.

2.1.2.2. Condensadores

El condensador es el cambiador de calor en donde el fluido de trabajo evacúa calor al ambiente, desprendiéndose de la entropía que absorbió de la carga fría más toda la generada en su circuito. La solución más simple de cambiador fluido-aire es poco eficiente porque el aire tiene muy poca transmisión térmica, y aumentarla forzando el flujo de aire es costoso y genera ruido; en cualquier caso, conviene poner aletas en el lado del aire para aumentar su transmisión (en los refrigeradores domésticos estas parrillas suele ocupar toda la parte trasera de la unidad).

Si se usa un cambiador fluido-agua la eficiencia es grande, pero surge el problema de qué hacer con el agua: tirarla es prohibitivo, excepto en las proximidades de un río, y reciclarla exige otro cambiador de calor agua-aire, lo que encarece la instalación y obliga a que el condensador opere a una temperatura algo mayor para compensar el salto térmico en el cambiador agua-aire. Y en el cambiador agua-aire se presenta el mismo problema de ineficiencia térmica en el lado del aire, aunque ahora se puede recurrir a un cambiador de torre húmeda, e incluso integrar el condensador en la torre húmeda de manera que el agua sea pulverizada directamente sobre los tubos del condensador en lugar de sobre un relleno cualquiera; en cualquier caso, estas pequeñas torres húmedas necesitan siempre un ventilador para forzar el tiro del aire.

2.1.2.3. Compresor

El compresor tiene dos funciones en el ciclo de refrigeración: en primer lugar succiona el vapor refrigerante y reduce la presión en el evaporador a un punto en el que puede ser mantenida la temperatura de evaporación deseada.

En segundo lugar, el compresor eleva la presión del vapor refrigerante a un nivel lo suficientemente alto, de modo que la temperatura de saturación sea superior a la temperatura del medio enfriante disponible para la condensación del vapor refrigerante. Existen tres tipos básicos de compresores: Reciprocantes, Rotativos y Centrífugos. Los compresores centrífugos son utilizados ampliamente en grandes sistemas centrales de acondicionamiento de aire, los reciprocante cuando existen una gran presión y un gasto bajo, y los compresores rotativos se utilizan en el campo de los refrigeradores domésticos.

Sin embargo, la mayoría de compresores utilizados en tamaños de menor caballaje para las aplicaciones comerciales, domésticas e industriales son reciprocantes. El diseño de este tipo de compresores es similar a un motor de automóvil moderno, con un pistón accionado por un cigüeñal que realiza carreras alternas de succión y compresión en un cilindro provisto con válvulas de succión y descarga. Debido a que el compresor reciprocante es una bomba de desplazamiento positivo, resulta apropiado para volúmenes de desplazamiento reducido, y es muy eficaz a presiones de condensación elevada y en altas relaciones de compresión.

Los parámetros que deben ser tomados en cuenta para el correcto funcionamiento del compresor, así como su adecuada selección son los siguientes:

- Válvulas en el compresor: la mayoría de las válvulas del compresor reciprocante son del tipo de lengüeta y deben posicionarse adecuadamente para evitar fugas. El más pequeño fragmento de materia extraña o corrosión bajo la válvula producirá fugas y deberá tenerse el máximo cuidado para proteger el compresor contra contaminación.

- Lubricación: siempre debe de mantenerse un adecuado suministro de aceite en el cárter, para asegurar una continua lubricación. En algunos compresores la lubricación se efectúa por medio de una bomba de aceite de desplazamiento positivo.
- Enfriamiento del compresor: los compresores enfriados por aire requieren un flujo adecuado de aire sobre el cuerpo del compresor para evitar su recalentamiento. El flujo de aire procedente del ventilador debe de ser descargado directamente sobre el compresor. Los compresores enfriados por agua están equipados con una camisa por la que circula el agua o están envueltos con un serpentín de cobre. El agua debe de fluir a través del circuito de enfriamiento cuando el compresor está en operación.
- Capacidad del compresor: los datos de capacidad los facilita el fabricante de cada modelo de compresor para los refrigerantes con los que puede ser utilizado. Estos datos pueden ofrecerse en forma de curvas o tablas, en indica la capacidad en Kcal/hora, a diversas temperaturas de succión y de descarga.

2.1.2.4. Válvula de expansión

La válvula de expansión es simplemente un estrangulamiento en el circuito del refrigerante que permite mantener la diferencia de presión entre el condensador y el evaporador, aunque a ella van ligados los dispositivos de autorregulación necesarios para mantener la densidad a la entrada del compresor constante frente a las variaciones del flujo de calor de la carga (aparte del control del motor por un termostato).

2.1.3. Ciclo de refrigeración

La refrigeración continua puede lograrse por diferentes procesos. En la gran mayoría de las aplicaciones y casi exclusivamente en las de pequeño caballaje, el sistema de compresión de vapor, comúnmente llamada ciclo básico de compresión, se usa para el proceso de refrigeración, en la figura 30 se muestra un ejemplo de este ciclo. Sin embargo, se han usado exitosamente sistemas de absorción en diversas aplicaciones. En equipo mayor se emplean los sistemas centrífugos, que son básicamente una adaptación del ciclo de compresión.

Existen dos presiones en el sistema de compresión: la de evaporación o baja presión y la de condensación o alta presión. El refrigerante actúa como medio de transporte para mover el calor del evaporador al condensador donde es despedido a la atmósfera o en casos de sistemas enfriados por agua, al agua de enfriamiento. Un cambio de estado de líquido a vapor y viceversa permite al refrigerante absorber y descargar grandes cantidades de calor en forma eficiente.

El ciclo básico opera de la siguiente forma: el refrigerante líquido a altas presiones es alimentado del recibidor a través de la tubería del líquido, pasando por un filtro de secado al instrumento de control que separa el lado de alta presión del sistema del lado de baja presión. Existen varios instrumentos de control que pueden emplearse, pero en esta ilustración consideramos únicamente la válvula de expansión.

La válvula de expansión controla la alimentación del refrigerante líquido al evaporador, y por medio de un pequeño orificio reduce la presión del refrigerante a la de evaporación o baja presión. La reducción de presión en el refrigerante líquido provoca que este hierva o se vaporice hasta que el refrigerante alcanza la temperatura de saturación correspondiente a la de su presión. Conforme el refrigerante de baja temperatura pasa a través del evaporador, el calor fluye a través de las tuberías del evaporador hacia el refrigerante, haciendo que la acción de ebullición continúe hasta que el refrigerante se encuentra totalmente vaporizado.

La válvula de expansión regula el flujo a través del evaporador conforme sea necesario para mantener una diferencia de temperatura determinada a cierto sobrecalentamiento deseado entre la temperatura de evaporación y el vapor que sale del evaporador. Conforme la temperatura del gas que sale del evaporador varía, el bulbo de la válvula de expansión registra esta variación y actúa para modular la alimentación a través de la válvula de expansión para adaptarse a las nuevas necesidades.

El vapor refrigerante que sale del evaporador viaja a través de la línea de succión hacia la entrada del compresor. El compresor toma el vapor a baja presión y lo comprime aumentando tanto su presión como su temperatura. El vapor caliente y a alta presión es bombeado fuera del compresor a través de la válvula de descarga hacia el condensador. Conforme pasa a través del condensador el gas a alta presión es enfriado por algún medio externo. En sistemas enfriados por aire, se usa, generalmente, un ventilador y un condensador aletado.

En sistemas enfriados por agua, se emplea generalmente un intercambiador de calor de refrigerante a agua. Conforme la temperatura del vapor del refrigerante alcanza la temperatura de saturación correspondiente a la alta presión del condensador, el vapor se condensa y fluye al receptor, repitiéndose nuevamente el ciclo. El proceso de refrigeración es continuo siempre y cuando funcione el compresor.

2.2. Funcionamiento convencional

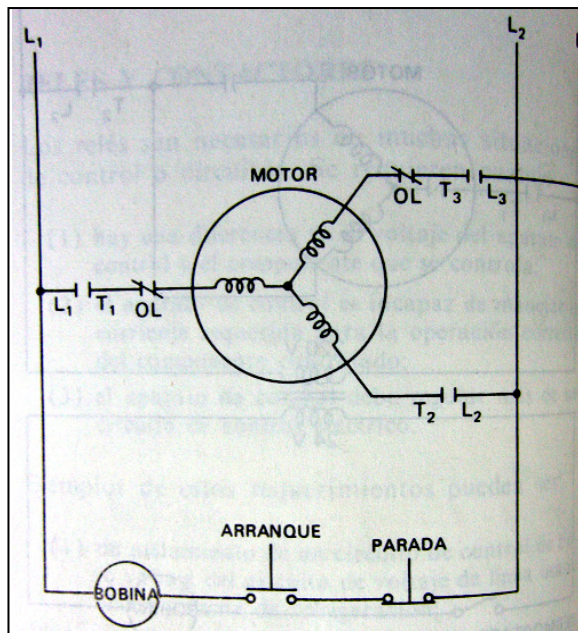
Los sistemas utilizados actualmente carecen de algún tipo de control avanzado, quedando limitados a la automatización básica en la operación del sistema. Los procesos de arranque y paro, control de temperatura, control de ventiladores, entre otros, se hacen por medios mecánicos.

2.2.1. Procedimientos de arranque y paro

Cuando no se requiere control automático para el arranque y paro en los cuartos fríos, se utiliza un arrancador normal de motor como el caso de los motores para ventilador o bomba que operan continuamente o de uno que se apaga y arranca a intervalos infrecuentes. El diseño puede ir de un simple interruptor o botón de presión hasta elaborados aparatos, los cuales proveerán protección para el motor. Puede también limitar la corriente que fluye al componente; o puede controlar por medio de aparatos adicionales el funcionamiento del sistema.

La figura 36 es un diagrama esquemático de un sistema eléctrico, muestra el control de un motor eléctrico (compresor) con el uso de un contactor operado por medio de un interruptor de botón de presión del tipo arranque y paro. Este diagrama también muestra protectores de sobrecarga instalados en las líneas de alimentación. Básicamente los arrancadores no son más que contactores que tienen protección de sobrecarga incorporada.

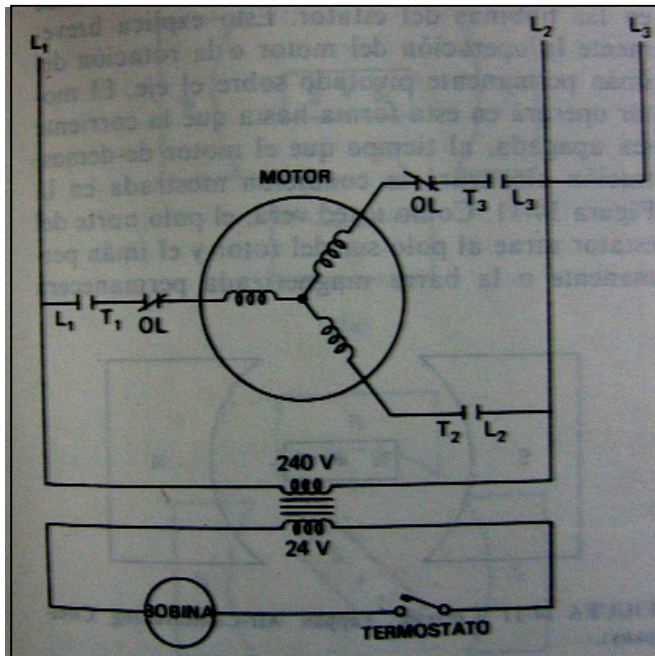
Figura 36. **Arranque simple de compresor**



Fuente: *AIR-CONDITIONING AND REFRIGERATION INSTITUTE. Refrigeración y aire acondicionado.* p. 168.

Si se desea o se requiere el control automático en una instalación dada, debe utilizarse un arrancador magnético a través de la línea. La figura 37 muestra un diagrama esquemático de un arrancador magnético arreglado para un control de tipo bialámbrico, para un termostato o un interruptor de baja presión.

Figura 37. Arranque controlado por termostato



Fuente: AIR-CONDITIONING AND REFRIGERATION INSTITUTE. *Refrigeración y aire acondicionado*. p. 169.

Estos aparatos tienen contactos relativamente livianos de peso, mediante el uso de un circuito de bajo voltaje y una bobina de retención, pueden activarse los voltajes de línea, tal como el motor de un compresor. En casos donde se utilice termostato el motor se detendrá al llegar a una temperatura determinada como la más baja y volverá a conectarse cuando sobrepase una temperatura determinada como la más alta, al igual que si este fuera controlado por presión, entonces este trabajará en un rango de alta presión (parar) y baja presión (arrancar).

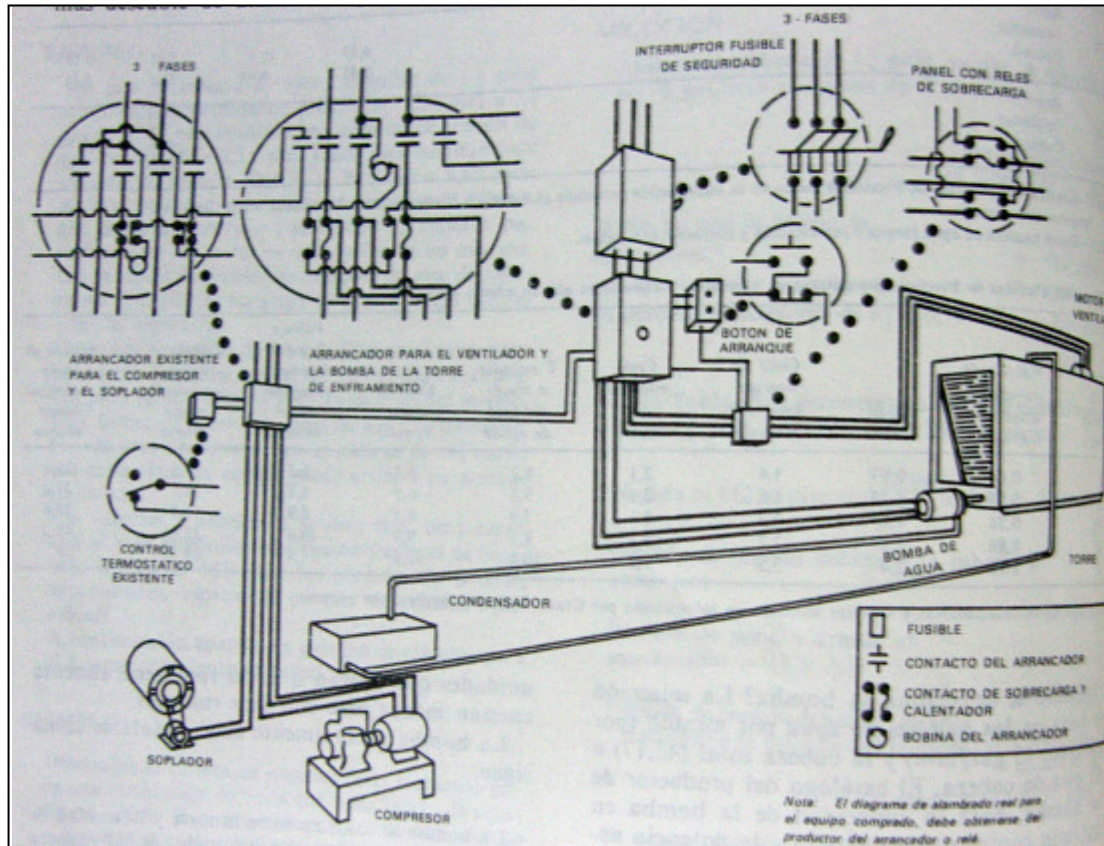
2.2.2. Funcionamiento de los ventiladores

El movimiento de aire en el interior del cuarto frío, ayuda conducir el calor lejos del producto. Los recipientes deben diseñarse y acomodarse para permitir la suficiente circulación de aire, mejorando el valor del enfriamiento y almacenando el producto a la temperatura óptima. Pueden ubicarse unos ventiladores en el interior del cuarto frío, buscando facilitar la circulación del aire, ya que ese es el requerimiento de la mayoría de los productos. El uso de ventiladores hace que la condensación se dé más rápido de lo normal. Los ventiladores que sean utilizados deben ser tomados en cuenta en la operación del cuarto frío.

Generalmente, en los ventiladores se utiliza el arranque directo para la puesta en operación, y el paro se hace a través de la desconexión de la fuente de alimentación, esto por medio de contactores, de manera similar al arranque y paro que se da en los compresores.

En la figura 38 se muestra la instalación eléctrica para el arranque de un cuarto frío que cuenta con ventiladores, además del compresor, se puede notar la similitud en los arranques. A diferencia del compresor los ventiladores no tendrán un paro frecuente en la operación normal, sin importar la presión o temperatura del cuarto un ventilador mantiene constante su funcionamiento, a diferencia del compresor, es por ello que por lo regular no se utilizan arranques de tensión reducida, sino simplemente contactores de arranque y paro.

Figura 38. **Instalación eléctrica convencional**



Fuente: AIR-CONDITIONING AND REFRIGERATION INSTITUTE. *Refrigeración y aire acondicionado*. p. 126.

2.2.3. **Aparatos de control**

Los controles se clasifican en general de acuerdo a su función en el sistema:

- Básicos de operación, son los aparatos que ponen el sistema en operación, por ejemplo los aparatos de medición.

- Reguladores, estos son los relacionados con controles que añaden automatización, conveniencia y generalmente mejoran la eficiencia total.
- De seguridad, funcionan para proteger al sistema en operación normal y anormal y aquellos que son requeridos por códigos o agencias reguladoras.

2.2.3.1. Aparatos de medición

Son de funciones de operación básica. Cada ciclo de compresión debe tener un medio que regulará el flujo de refrigerante líquido de alta presión, desde la línea de líquido al evaporador. Los cinco tipos principales de aparatos de medición usados en varias fases del trabajo de refrigeración son:

- Válvula de expansión automática: este nombre no es descriptivo según su operación, pues otros tipos de válvulas de expansión también son automáticas. Más apropiadamente se debería de llamar válvula de expansión de presión constante en el evaporador, por que mantiene la salida constante, independientemente de los cambios en la presión del líquido de entrada, la carga u otras condiciones.
- Válvula de expansión termostática: antes de describir el funcionamiento de la válvula es necesario repasar el concepto de supercalentamiento. El supercalentamiento es la diferencia entre la temperatura del gas y la de saturación, es decir la temperatura de evaporación correspondiente a la presión de gas.

Por ejemplo, una válvula inyectora inyecta cierta cantidad de refrigerante al evaporador cuando llegue a determinada temperatura (suponemos 20°F) el refrigerante comienza a hervir debido a la sustracción de calor a su alrededor. Se presenta el fenómeno de que el refrigerante a la salida tiene una temperatura de 30°F, se dice entonces que tiene 10°F de supercalentamiento. La condición ideal sería que la válvula esté lo suficientemente abierta para dar 0°F de supercalentamiento del refrigerante que sale del serpentín. Si la válvula está demasiado abierta, sería posible que fluyera líquido al compresor, esta operación es sumamente peligrosa, ya que se puede dañar el mismo.

La válvula de expansión termostática (TEV) controla el flujo de refrigerante manteniendo un supercalentamiento relativamente constante en el extremo del evaporador.

- Tubo capilar: es una restricción deliberada en la línea del líquido. A causa de su pequeño diámetro, crea una considerable caída de presión, que es medible.
- Flotador del lado de baja: colocado en el lado de baja presión, el medio primario de control es el nivel de líquido en la cámara del flotador. Se usa siempre con un evaporador inundado. El flotador puede localizarse dentro del evaporador o en una cámara de flotador adyacente. Cuando la carga aumenta y el nivel del evaporador baja el flotador también baja dejando al descubierto un orificio por donde entra más líquido, cuando la carga baja y se restaura el nivel del evaporador el flotador cierra el orificio y deja de entrar líquido.

- Flotador del lado de alta: éste se encuentra inmerso en el lado de alta presión, el cual es el sistema primario de control. Sólo puede usarse en un sistema que tenga una carga crítica de refrigeración. Cuando el nivel de líquido aumenta el flotador se abre y permite el paso de líquido al evaporador. Este control permite que el líquido fluya al evaporador en el mismo rango que el al condensador; por lo mismo no hay provisión del sistema para el almacenamiento de líquido diferente al del evaporador.

2.2.3.2. Controles básicos de operación (de ciclo)

El control básico del ciclo es un aparato que para y arranca, regula y protege el ciclo de refrigeración y sus componentes aunque puede tomar casi cualquier forma y ser operado por diferentes fuerzas tales como la temperatura o presión, la función del control del ciclo como se definió es siempre la misma.

Hay dos categorías de controles de ciclo, primario y secundario. Un control primario realmente arranca y para el ciclo, bien sea directa o indirectamente como lo dicten los requisitos de temperatura o humedad. Los controles secundarios regulan y/o protegen el ciclo cuando son requeridos bien sea por controles primarios o condiciones dentro del ciclo. Muchos controles pueden servir para ambas funciones.

Hay tres tipos de controles primarios:

- El primero es operado por temperatura y se llama termostato, puede ser bimetalico, de fuelle o de bulbo de mercurio.
- El segundo es operado por presión y se llama preóstato, este se divide en dos categorías tipo fuelle y tubo de Bourdon.

- El tercero es operado por humedad y se llama humidóstato, se usan elementos higroscópicos siendo el más común el de hilo o cabello.

Cada uno de estos controles puede usarse para regular la operación del ciclo. Por ejemplo cuando una nevera se calienta demasiado, esto es, la temperatura viene a ser demasiado alta para almacenamiento de comida, el termostato la percibe y arranca el compresor. Los preóstatos a menudo se usan para controlar condiciones de temperatura en vitrinas refrigeradas controlando la presión del evaporador. Cuando la presión del evaporador y su temperatura correspondiente suben, el preóstato opera y arranca el compresor. En cuartos de almacenamiento donde la humedad es importante, el humidóstato se diseña para arrancar el ciclo de refrigeración cuando la humedad sube a un punto determinado.

Los controles secundarios pueden dividirse en dos categorías: los controles de operación y los de seguridad. Los controles de operación pueden regular el ciclo durante la operación normal, entre los controles de operación están los aparatos de medición, los contactores y las válvulas que regulan el paso de agua, refrigerante y gas. Los de seguridad están diseñados para proteger los componentes del sistema de refrigeración y no deben operar a menos que ocurra un mal funcionamiento.

2.2.3.3. Sistema de seguridad

En el sistema de seguridad está constituido por los controles secundarios de seguridad. El primero de ellos es el control térmico de sobrecarga, este es un control eléctrico que protege al sistema contra la corriente excesiva.

El fusible común es un buen ejemplo de este tipo de protección en motores; sin embargo, se utilizan protectores con reposición (interruptores termo magnéticos). El relé de corriente es otro tipo de protector eléctrico que puede reposicionarse manualmente o automáticamente. La mayor ventaja de este tipo de relé es que se afecta sólo ligeramente por la temperatura ambiente, anulando así señales no previstas.

Los termostatos también pueden servir de control de seguridad, si se especifica el funcionamiento a una temperatura determinada. Un termostato puede servir también como un sensor de temperatura que interrumpa el circuito cuando exista una temperatura fuera del margen de funcionamiento. Esto parará el compresor y evitar algún tipo de daño en el sistema.

El interruptor de alta presión es el más usado como control de presión para propósitos de seguridad. Puede parar el compresor antes de llegar a presiones excesivas, tales condiciones pueden ocurrir a causa de falla en el suministro de agua en condensadores enfriados por agua o por que el motor del ventilador falle en condensadores enfriados por aire.

El interruptor de baja presión es usado con el fin de detener el compresor cuando exista una presión por debajo de lo normal, esto usualmente ocurre en baja carga, alta relación de compresión, congelamiento del evaporador y entrada de aire en el sistema a través del lado de baja.

El interruptor de seguridad del aceite mide la diferencia de presión entre la presión de descarga de la bomba de aceite y la presión de succión y detiene el compresor si la bomba no mantiene la presión de aceite prescrita por el fabricante.

Cuando un compresor arranca no hay presión de aceite. La presión total de aceite sólo se obtiene cuando el compresor llega a su velocidad nominal. Por consiguiente un aparato con retardo de tiempo se incorpora en este tipo de control para permitir suficiente tiempo para el arranque. Si la presión cae durante la operación, el interruptor se energiza y a menos que regrese la presión en el período de retardo de tiempo, el compresor es apagado. El compresor no puede operar más allá de un período de tiempo con presión de aceite subnormal, es por ello que el retardo de tiempo en estos controles es ajustable en el rango de 50 a 125 segundos.

2.3. Funcionamiento a implementar

Básicamente el funcionamiento a remplazar será el encargado de suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del compresor, dejando así el sistema mecánico intacto y funcionando de manera convencional.

2.3.1. Procedimientos de arranque y paro

Los procedimientos de arranque y paro son críticos en las unidades refrigeradoras debido al gran consumo de corriente que se tiene en los instantes del arranque, para solucionar este problema se incorporó en el sistema eléctrico un variador de frecuencia el cual tiene como propósito controlar el funcionamiento del compresor y aprovechar al máximo la energía suministrada por la red. Éste hará que el compresor no arranque de 0 a 100% de su velocidad inmediatamente, lo cual conlleva un gran consumo de energía, sino que hará que el arranque se dé paulatinamente y conforme pase el tiempo este logre llegar al 100% de su velocidad pero sin haber aumentado el consumo de corriente, sino que manteniéndola casi constante en su valor nominal.

Esto se podrá conseguir haciendo correcciones de la velocidad del compresor en base a mediciones de temperatura y presión el sistema, especificadas según los criterios utilizados para construir el cuarto frío y los alimentos que se pretendan almacenar. Además el sistema será capaz de tomar decisiones de cuando debe parar el compresor y cuando debe solamente bajar su velocidad, siendo así un sistema capaz de ahorrar mayor cantidad de energía de lo que comúnmente se tiene.

Este sistema inteligente se basa en la programación interna del variador, la cual será descrita en capítulos posteriores. Así como su interconexión con los demás elementos que constituyen el nuevo sistema.

2.3.2. Funcionamiento de los ventiladores

La función de los ventiladores no cambiará solamente los momentos en los cuales estos estén en operación. La diferencia está en que el sistema tomará decisiones de cuando arrancar los ventiladores tomando en cuenta mediciones de temperatura, presión diferencial entre el evaporador y el condensador, y la humedad existente en el cuarto frío, esto para evitar la formación de escarcha en el condensador.

El arranque y paro de ventiladores seguirá siendo directo a través de contactor. Si los ventiladores fuesen de un caballaje demasiado alto (arriba de 7.5 Hp) se consideraría la utilización de variadores de frecuencia.

2.3.3. Instrumentación necesaria para el proceso

Toda la instrumentación mecánica utilizada actualmente para monitorear el proceso no será removida sino que simplemente se conectará en paralelo al nuevo sistema, esto con el fin de lograr una comparación entre ambos sistemas. En el futuro la meta será utilizar únicamente instrumentación eléctrica para controlar el proceso.

Entre la instrumentación mecánica presente se tiene un termostato, un termómetro, indicadores de presión de alta y baja, así como un control con salida a relevador que indica si la presión de aceite está baja o normal.

Los sensores a utilizar son:

- Termopar tipo k
- Sensores de presión
- Sensor de humedad
- Sensor de presencia (*Limit Switch*)

2.3.4. Equipo y materiales a utilizar

Para la realización de la propuesta de automatización es necesario contar con el siguiente equipo, materiales y sensores, adicional a la lista la descripción técnica de lo necesario y la justificación de cada componente.

- Computadora: en esta se desarrollará todo el sistema supervisorio y de control del cuarto frío. Tiene como objetivo mostrar al operador todas las virtudes que un sistema SCADA puede ofrecer.

Las especificaciones de ésta, dependerán también de los requerimientos para otras áreas del usuario final.

- Pantalla táctil: es el medio de control y supervisión local que se instalará en inmediaciones del cuarto frío, además de la exportación de datos provenientes del proceso al sistema SCADA. Pantalla a color 24Vdc, múltiples protocolos de comunicación.
- Variador de frecuencia: para 5Hp 220Vac, es el dispositivo encargado del control del compresor, por medio de este se hará la reducción del consumo de energía eléctrica, además, gobernará sistemas de arranque y paro de otros dispositivos como lo son los ventiladores, bomba de aceite, etc. Además de los correspondientes módulos adicionales para el variador:
 - I/O análogas: entradas y salidas adicionales para la conexión de los sensores que se utilizarán.
 - Módulo de aplicaciones: utilizado para crear aplicaciones más sofisticadas que requieren más memoria y un control más eficiente.
 - Modulo *Ethernet*: habilita la conexión vía *Ethernet* a diferentes dispositivos en una misma red.
- *Switch*: se utilizará para hacer la conexión entre el variador de frecuencia, la pantalla táctil y la computadora. Adicionalmente se necesitarán cables y conectores para la conexión.

- Sensor de temperatura: su objetivo principal es el de controlar la temperatura interna dentro de cuarto frío. Es de tipo K con cabeza tipo proceso y termopozo de acero inoxidable, además de su respectivo control análogo salida 4-20 mA. Es necesario por el tipo de aplicación que cumpla con normas sanitarias correspondientes.

- Sensores de presión: Son varios sensores que se utilizarán para:
 - Medida de presión en la línea proveniente del evaporador. 0 a 100 PSI control tipo análogo, 4-20 mA.

 - Medida de presión en la línea proveniente del condensador. 0 a 500 PSI control tipo digital salida a relevador.

 - Medida de presión de aceite. Tipo digital salida a relevador.

- Sensor de humedad: tiene como propósito la medición de humedad relativa del cuarto, esta medición es necesaria para garantizar la calidad del producto interno. Medición de 0 a 80 %RH control tipo análogo 4-20 mA. Norma Sanitaria.

- Sensor de presencia: tipo digital salida a relevador, 5A 120/220 Vac. Su utilización dentro del sistema será verificar cuando la puerta se encuentre abierta y cuando no.

- Fuente de voltaje 24Vdc: es una fuente de corriente continua, la cual es necesaria para la alimentación de la pantalla táctil y sensores.

- Contactores: éstos harán la conexión física entre los el aparato de control (variador) y los motores a controlar. Éstos conforman el circuito de potencia. Para 5Hp, corriente nominal 16A
- Relevadores: son dispositivos de interconexión entre las entradas de algunos sensores especiales y la salida al circuito de potencia. Relevador de acople 10A 220Vac, con luz indicadora.
- Gabinete: 800 x 600 x 300 mm, con ventilador para panel 220Vac.con rejilla, entrada para cables de alimentación y puerta abatible, con empaque, para montaje en pared. Es el elemento que contendrá toda la instalación eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema, así como el variador de frecuencia, dándole la protección adecuada. Debe contar con ventilación adecuada para evitar daños debidos al calor que generan los equipos. Adicional una luz que permita la visibilidad dentro del gabinete.
- Interruptor termomagnético: es usado para asegurar la protección por cortocircuito y por sobrecarga de la instalación eléctrica, en la instalación se usarán de diferentes tipos.
- Fusibles: de tipo semiconductor 10 x 38. Circuitos de protección para la instalación eléctrica. Además de proteger todos los demás componentes en la instalación, incluyendo sensores. Se usarán diferentes amperajes.
- Portafusibles: tripolar para colocar los elementos de protección. Monopolar para los demás elementos. Todos con indicación de led.

- Guardamotor: trifásico de 5Hp corriente nominal de 15 a 18 A. Componente electrónico que se encarga de proteger al motor y variador contra todas aquellas situaciones fuera de lo común, que representen un peligro para la integridad de los equipos. Se tienen diferentes protecciones en el equipo como lo es la pérdida de fases, cortos entre fases o a tierra, entre otros.
- Cable: de diferentes calibres a especificar. Necesario para toda conexión eléctrica que se deba realizar.
- Borneras tipo caballete: elementos que servirán como puntos de conexión entre los equipos. Se necesitarán también borneras especiales para conexión a tierra y para las fases. Se usarán además separadores entre borneras de fase y topes para borneras para asegurarlas.
- Riel din: sujetado al gabinete, en el interior del mismo. Se necesita para la sujeción de las borneras, contactores y demás elementos dentro del gabinete.
- Canaleta: es una protección mecánica para todo el alambrado que se tenga que hacer.
- Transformador de control: 120/240 Vac 250VA. Su función primordial será la conversión de 220Vac a 120Vac. Para la conexión de equipos que no soporten 220Vac, como es el caso del *Switch*.
- Tomacorriente: durante cualquier monitoreo local se podrá conectar cualquier equipo a la toma de 120Vac. Por ejemplo una computadora portátil.

- Luz de alarma: necesaria para notificar al operador que ha sucedido un evento fuera de los límites permisibles de funcionamiento. 220Vac.
- *Buzzer*: unido a la alarma visual este indica la presencia de una anomalía en el funcionar del cuarto frío. 220Vac.
- Conector horario 6 tipo péndulo: provee una conexión segura y eficiente para el compresor. Macho y hembra.
- Conector prensa estopa: es un elemento que permite el ingreso y egreso de los conductores al gabinete de control.
- Interruptor rotativo: corta toda alimentación del circuito de potencia, en caso de falla o paro general de la máquina es más práctico que el uso de interruptor termomagnético. Sólo se utiliza para interrumpir el paso de corriente, no puede ser utilizado como protección.
- Paro de emergencia, pulsador tipo hongo: corta la alimentación de todo el circuito de control, limitando también el funcionamiento del circuito de potencia.

2.3.5. Sistema de seguridad

Aquellos sistemas de seguridad eléctrica como el interruptor termomagnético no serán remplazados, se incluirán únicamente adicionales para garantizar la seguridad del equipo y personas encargadas de su operación.

En serie con el variador se incluirán fusibles semiconductores para prevenir que cualquier falla dañe al variador.

El variador por su construcción servirá de protección para el motor del compresor, logrando detectar fallas en el suministro eléctrico (como pérdida de energía o sobrevoltaje) y fallas en el motor (pérdidas de fase, atrancamiento en el motor lo cual provocaría una elevada corriente), procediendo a la desconexión inmediata.

En cuanto al sistema en general la seguridad que se propone, es una supervisión eficiente de todos los aspectos necesarios para el funcionamiento del cuarto frío, así como aquellas situaciones en las cuales la operación se salga de control y sea necesario el paro de labores dentro del sistema, dejando constancia de lo que llevó a tomar estas medidas.

2.3.6. Correcciones del proceso

El control de velocidad del motor del compresor es la parte central del sistema, con este se espera lograr mantener temperaturas más constantes en las instalaciones de refrigeración, para aumentar la calidad de servicio que se brinda. Además de reducir la demanda de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del proceso.

Es por ello que la corrección del proceso se logra por medio del variador de frecuencia. Se implementará un lazo de control más acorde al objetivo del cuarto frío que el que convencionalmente se usa, control PID. La variable controlada será la de presión de succión en el sistema, monitoreando para esto la presión de baja (evaporador), y la de alta (condensador) solo servirá para garantizar un estado correcto de operación.

Cuando la diferencia exceda un límite el compresor deberá reducir su velocidad hasta el punto de detenerse por completo.

Una nota importante es que de ninguna manera el compresor operará por debajo de su velocidad crítica, debido a que esto puede ocasionar fallas en el compresor por el arrastre entre mecanismos internos al movilizar la carga, dicha velocidad crítica depende del tamaño del motor de compresor y está entre el 50% y 75% de la velocidad nominal.

Una vez detenido el compresor, si cae la presión por debajo del valor aceptado el compresor volverá a funcionar. Primero lo hará a baja velocidad, y si la diferencia persiste se incrementará hasta alcanzar el 100% de su capacidad de velocidad para controlar la caída de presión. El arranque y paro como se comentó antes se hará lentamente en un tiempo determinado, el cual podrá ser modificado por el usuario, en un rango que garantice un buen funcionamiento y un uso adecuado del compresor.

Con la medición de la temperatura se controlan los valores límites de diferencia de presión, éstos tienen un rango de variación establecido pero que cambia dependiendo de las condiciones internas. Así por ejemplo, si se ha agregado producto al cuarto y necesita ser enfriado, la medición de temperatura elevará el valor máximo de diferencia de presión con lo que el compresor no bajará de velocidad, ni menos parará hasta alcanzar la temperatura objetivo.

La descripción anterior del sistema se basa en una explicación puntual de un lazo PID, se respetan las condiciones necesarias para ponerlo en marcha, y se pretende que el control sea suficientemente sencillo para ponerlo en práctica, pero conjuntamente altamente confiable.

2.4. Comparación técnica

Para realizar una comparación entre el funcionamiento del sistema convencional con el sistema que se propone, fueron necesarias 20 secciones de medición de energía en la red de alimentación de 16 horas cada una (debido a que esto es lo que normalmente opera el compresor en esta instalación). 10 secciones fueron hechas con el sistema convencional de arranque directo y otras 10 con el sistema propuesto, el compresor gobernado con variador. Esto fue realizado en instalaciones refrigeradas de un caballaje distinto al que se va a trabajar (7,5 Hp), pues lo que se busca es una relación porcentual del ahorro en el consumo de energía por el uso del variador, la tabla VI muestra los resultados.

Tabla VI. **Consumo de kW/h. Comparación entre sistemas**

	CONVENCIONAL	A IMPLEMENTAR	REL. %
Día 1	80,96	62,62	22,65
Día 2	79,24	60,97	23,89
Día 3	78,86	63,20	19,86
Día 4	82,14	66,31	19,27
Día 5	84,45	65,67	22,24
Día 6	80,62	60,98	24,36
Día 7	79,89	62,74	21,47
Día 8	81,02	65,80	18,79
Día 9	82,74	68,82	16,82
Día 10	78,57	61,52	21,70
TOTAL	808,49	638,63	21,10

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que con el uso de variador para controlar el motor del compresor se ahorró el consumo de energía eléctrica en un 21,10% en promedio, esto se traduce a una menor cantidad de kW/h consumidos, y consecuentemente menores costos de operación, esto se verá más a fondo en el capítulo siguiente.

También es necesario recalcar que el consumo de kW/h está directamente ligado a la utilización que se le dé al cuarto frío, y la manera en que este es operado. Así la energía consumida dependerá de cuantas veces al día fue abierta la puerta, si hubo o no carga de producto dentro del cuarto, la temperatura ambiente, la temperatura a la cual ingresa el producto, etc. Todos estos parámetros son variables día con día, por lo cual no se puede hablar de un consumo exacto por períodos de tiempo, pero si se puede ofrecer una ventana de ahorro energético comprendido entre 16% a 24% de lo consumido por la instalación convencional.

2.4.1. Ventajas

- El sistema convencional no tiene una manera eficiente de utilizar la energía, problema resuelto con la implementación de un variador de velocidad que logra aprovechar al máximo la utilización del compresor.
- El control del sistema es inteligente y se puede evitar paros innecesarios debido a la mala toma de decisiones por parte del operario.
- El sistema lleva un historial sobre cada suceso en el cuarto frío, logrando así un flujo de información más confiable para el supervisor, jefe de mantenimiento o ingeniero de planta encargado.

- Con este sistema se pretende reducir el personal necesario para llevar a cabo la operación del cuarto, así como la cantidad de horas utilizadas para el mantenimiento, supervisión y demás actividades realizadas por una persona.
- Las unidades de supervisión son remotas, por lo que no es necesario estar físicamente donde se encuentra el cuarto frío para tomar lecturas de los aparatos de medición y demás monitoreo de rutina.

2.4.2. Desventajas

- El sistema tiene más elementos eléctricos y de instrumentación que el convencional, por lo que se necesita personal calificado para la instalación eléctrica, no así para la instalación mecánica que sigue siendo la misma.
- Dependiendo del tamaño del compresor (en caballos, Hp), el variador de frecuencia puede crecer de tamaño proporcionalmente a él, con lo que el espacio necesario para la instalación también aumenta.
- Se necesita que el personal que lo opere esté capacitado para hacerlo, y que tenga conocimientos del sistema que se ha implementado. Siendo este un sistema nuevo requerirá de tiempo y capacitación para lograr este tipo de personal.

3. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

Antes de comenzar a desarrollar el estudio, es necesario aclarar que los costos aquí propuestos están sujetos a variaciones del mercado ajenas a este documento y que sólo se puede trabajar con un estimado bastante cercano al valor real por la misma situación.

Asimismo, especificar que el costo de los equipos cotizados obedece puramente al funcionamiento eléctrico, debido a que se entiende que el funcionamiento mecánico del cuarto frío no tendrá ninguna variación en el sistema convencional como en el sistema propuesto, por lo que solo se cotizó y se hizo el estudio en base a los elementos del sistema eléctrico propuesto, pues es aquí donde se dará la variación de capital invertido y así mismo recuperado.

3.1. Funcionamiento convencional

Se toma como sistema convencional, un cuarto frío que pueda mantener el producto a una temperatura determinada, sólo se incluye los elementos necesarios para esto y aquéllos necesarios para la medición de temperatura.

3.1.1. Costos de equipo

Se presenta el más común de los métodos utilizados para la puesta en marcha de compresores en cuartos frío; los sistemas para el arranque de ventiladores en condensador y evaporadores funcionan de la misma manera, el costo de los materiales eléctricos se presenta en la tabla VII.

Tabla VII. **Costo de materiales eléctricos**

<i>Cant.</i>	<i>Material</i>	<i>Uni. (Q.)</i>	<i>Total (Q.)</i>
1	Interruptor Termomagnético 3x16 A.	65,00	65,00
3	Contactador 16 A.	120,00	360,00
1	Pulsador Verde NO	45,00	45,00
1	Pulsador Rojo NC	45,00	45,00
1	Paro de emergencia, pulsador tipo hongo	60,00	60,00
30	Cable SJT 3x12 metro.	12,00	360,00
20	Cable THHN 12 metro.	3,40	68,00
	TOTAL		1 003,00

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Costo de mantenimiento y montaje

Los costos de montaje en una instalación normalizada de refrigeración industrial incluyen los siguientes rubros:

- Instalación de los componentes eléctricos.
- Cableado de los componentes de control a los componentes mecánicos (compresor, evaporador, condensador, resistencias).
- Cableado del tablero principal al punto de conexión con la nueva instalación.

El tiempo estimado para completar estas operaciones es de 6 horas. El costo de hora por mano de obra es de Q. 100,00. Cabe destacar que los costos por mano de obra no están estandarizados en Guatemala y éstos varían de empresa a empresa. En promedio este es el valor aceptado.

El mantenimiento de una instalación de refrigeración consiste en la inspección diaria de los elementos que lo componen, para ello regularmente se cuentan con dos a seis técnicos en refrigeración que según turnos de operación inspeccionan las instalaciones.

En casos de mantenimiento correctivo la misma cantidad de técnicos será necesaria para encontrar y luego solucionar el problema que se presente. Debe tomarse en cuenta que la cantidad de técnicos está en función del tamaño de la instalación. En este caso se tomará como base la utilización de los servicios de cuatro técnicos en refrigeración.

Adicionalmente se toma en consideración que cada vez que se pare la producción debido a mantenimiento no programado, esto representa pérdidas económicas para la empresa, las cuales se tomarán en cuenta como costos adicionales a los costos totales de operación.

3.1.2.1. Cálculo de salario por operario

Se calcula el precio del mantenimiento con base en los salarios de los operarios los cuales se les asignará el salario mínimo de Q. 1 600,00, esto según el salario mínimo aceptado por la Constitución Política de la Republica y Ministerio de Trabajo. Para calcular el sueldo real de un operario se toman las siguientes consideraciones:

- Se toman como base los precios actuales del mercado con una tasa de inflación del 6%, incrementándose los costos cada año, durante la vida útil del proyecto.
- Los salarios, así como prestaciones laborales y demás pagos se han establecido para calcular el costo real de cada operario al mes considerando un crecimiento del mismo del 10% cada 3 años.
- Se realiza el siguiente cálculo para determinar el costo real de cada empleado por mes, si se toman en cuenta todas las prestaciones de ley.

Sueldo real = sueldo + bono 14 + aguinaldo + vacaciones + cuota patronal
IGSS + reserva de indemnización.

Bono 14	=	1/12 del sueldo base
Aguinaldo	=	1/12 del sueldo base
Vacaciones	=	20/365 del sueldo base
IGSS	=	12,41% del sueldo base
Reserva Indemnización	=	1/12 del sueldo base
Total	=	0,43

En total se multiplica por un factor de 1,43

Sueldo real = sueldo*1,43

Sueldo real por empleado = 1 600*1,43 = Q. 2 288,00 por mes

= 2 288*12 = Q. 27 456,00 por año

Total de sueldos en un año contando con los servicios de cuatro operarios.

Q. 109 824,00.

3.1.3. Costos de operación

Los costos de agua, energía eléctrica, teléfono y demás rubros que usualmente son los principales en cualquier empresa se cotizaron en el mercado actual y se considera un crecimiento de hasta el 6% por año en los precios que se han establecido. En esta oportunidad se toma en cuenta sólo el costo de energía eléctrica. Los resultados obtenidos son productos de varios estudios hechos a lo largo del 2009, en diferentes instalaciones de refrigeración. Por seguridad se reservan los datos e información de las empresas, el resumen se muestra en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Costo mensual de energía eléctrica en instalaciones refrigeras**

MES	COSTO E.E. (Q.)
Enero	78 486,02
Febrero	77 182,15
Marzo	95 179,23
Abril	106 184,54
Mayo	113 948,02
Junio	107 846,52
Julio	113 867,54
Agosto	121 575,51
Septiembre	133 014,94
Octubre	158 084,20
Noviembre	132 678,48
Diciembre	137 133,47
Total Anual	1 375 180,62

Fuente: elaboración propia.

3.2. Funcionamiento a implementar

Para la solución a implementar se deben tomar en cuenta las señales necesarias para las mediciones importantes en el proceso, los actuadores necesarios para lograr el control deseado y conseguir el ahorro energético en la operación.

3.2.1. Costo del equipo

A continuación se detallan los equipos y materiales que son necesarios para la implementación de la solución de automatización. Estas cotizaciones fueron realizadas en distintas empresas, según requerimientos del tipo de material y proveedores existentes. Los precios aquí propuestos están sujetos a variaciones en el mercado. Precios en Quetzales, ver tabla IX.

Tabla IX. **Costo de materiales eléctricos para el sistema propuesto**

SENSORES

	MATERIALES	UNI.	TOTAL
1	Termopar tipo K con transmisor 4 – 20 mA. Con vástago de 12 pulg. Cabeza tipo industrial con termopozo de acero inoxidable. Norma Sanitaria.	250,00	250,00
1	Control de temperatura análogo 4-20 mA 110/220V.	405,35	405,35
1	Sensor de humedad, 0 – 80% RH acero inoxidable. Norma Sanitaria. Transductor 0 -10 v.	232,00	232,00
1	Sensor de presión. Presión de Baja. 0 – 100 PSI. Transductor 4 – 20 mA.	1 750,00	1 750,00
1	Sensor de presión de Aceite. On/Off	475,00	475,00

Continuación tabla IX.

1	Sensor de presión. Presión de Alta. 0 – 500 PSI. On/Off	620,00	620,00
1	<i>Limit Switch</i> 5A 250Vac, 0.4A 115Vdc	225,00	225,00
	SUBTOTAL		3 957,35

EQUIPO

	MATERIALES	UNI	TOTAL
1	Variador de frecuencia <i>Unidrive SP</i> 5Hp 220v	12 000,00	12 000,00
1	Módulo <i>Aplication lite</i>	4500,00	4 500,00
1	Módulo <i>I/O lite</i>	3 500,00	3 500,00
1	Módulo <i>Ethernet</i>	3 500,00	3 500,00
1	CTVU 306 Color	15 000,00	15 000,00
1	Cable para comunicación <i>CT comm</i>	350,00	350,00
	SUBTOTAL		38 850,00

PROTECCIONES Y DEMÁS MATERIALES

	MATERIALES	UNI.	TOTAL
1	Gabinete 800 x 600 x 300 mm., con empaque en la puerta	850,00	850,00
1	Ventilador con rejilla para panel, 220 Vac	205,00	205,00
1	Rejilla para tablero	90,00	90,00
1	Bombilla para panel, 120Vac 50W	4,25	4,25
1	Lámpara para panel	9,45	9,45
5	Riel DIN 35 mm., metro	18,00	90,00

Continuación tabla IX.

15	Canaleta con ranura 40X60, metro	64,80	972,00
1	Paro de emergencia, Pulsador tipo hongo	60,00	60,00
1	Interruptor termomagnético 2x1A 220 Vac	55,00	55,00
1	Guardamotor 5Hp, corriente nominal 16 A.	265,00	265,00
3	Fusibles semiconductores 10.3 x 38 de 16 A nominal	19,00	57,00
1	Portafusibles trifásico 10 x 38 con luz indicadora	56,00	56,00
1	Fuente 24 Vdc 4ª, entrada 220Vac	175,00	175,00
2	Fusible semiconductor 10 x 38 de 6ª	10,00	20,00
2	Porta fusible monofásico 10 x 38 con luz indicadora	34,00	68,00
1	Fusible de respuesta rápida 4ª	3,25	3,25
1	Porta fusible respuesta rápida riel DIN	12,50	12,50
1	Transformador de Control 220/120 Vac, 250VA	325,00	325,00
1	Interruptor termomagnético 2x2 A	58,00	58,00
1	Interruptor termomagnético 1X4 A	42,00	42,00
1	Tomacorriente	13,75	13,75
1	Switch 120Vac	125,00	125,00
10	Relevador de acople 10ª 240 Vac con luz indicadora	55,00	550,00
6	Contactador 10ª	70,00	70,00

Continuación tabla IX.

8	Bornera con fusiblera (fusible tipo mini europeo)	32,00	256,00
8	Fusible tipo mini europeo 1 ^a	2,25	18,00
6	Borneras de Fase 6mm tipo caballete	9,00	54,00
6	Separador para bornera 6mm	6,00	36,00
1	Luz de alarma 220Vac	75,00	75,00
1	<i>Buzzer</i> 220Vac	45,00	45,00
100	Conectores tipo pin	1,25	125,00
1	Etiquetador de cable tipo anillo	65,00	65,00
1	Conector horario 6 tipo péndulo hembra y macho 4 pines	235,00	235,00
6	Conector prensa estopa	14,00	84,00
1	<i>Switch</i> rotativo de manija	90,00	90,00
1	Broca sierra de ½ pulg.	15,00	15,00
	SUBTOTAL		5 884,20

CABLE

M.	TIPO DE CABLE	PRE. M.	TOTAL
15	SJT 4x10, para compresor	28,00	420,00
15	SJT 3x12, para evaporador	12,00	180,00
15	SJT 3x12, para condensador	12,00	180,00
15	SJT 3x10, para resistencias	21,00	315,00
45	Para sensor 3x18 blindado (acorazado)	3,40	153,00

Continuación tabla IX.

1	SAE 18 AWG negro, rollo	4,80	4,80
1	SAE 18 AWG verde, rollo	4,80	4,80
1	SAE 18 AWG blanco, rollo	4,80	4,80
15	UTP 4 pares	3,25	48,75
2	Conector RJ45 con capucho	2,75	2,75
	SUBTOTAL		1318,70
GRAN TOTAL			Q. 50 010,25

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Costos de mantenimiento y montaje

Los costos para montaje del sistema serán calculados con base al tiempo utilizado para la puesta en marcha de la solución, los factores a tomar se describen en la tabla X.

Tabla X. **Cantidad de horas por servicio**

Servicio	Hrs.
Acondicionamiento del gabinete	20
Instalación física de los elementos que componen el sistema	20
Cableado de los elementos	20
Diseño del programa que controlara el variador de frecuencia	30

Continuación tabla X.

Elaboración del sistema SCADA para la pantalla táctil	80
Interconexión entre elementos del sistema SCADA	40
Puesta en marcha y ajustes finales	10
TOTAL	300

Fuente: elaboración propia.

El costo por hora de ingeniería será de Q. 150,00, con lo cual el costo estimado para la puesta en marcha del sistema es de Q. 45 000,00

Una de las principales ventajas del sistema es la falta de mantenimiento por medio de operarios, el sistema es capaz de monitorear la operación del cuarto frío por sí mismo, e informar al encargado cuando suceda una falla o haga falta su atención. Con lo anterior se reduce el número de operarios a uno para el correcto funcionamiento del cuarto frío. Por lo que el costo de operarios se reduce a Q. 27 456,00 al año.

3.2.3. Costos de operación

Los costos de operación están basados en el estudio económico mostrado en la sección 3.1.3.; se hace una proyección de ahorro de hasta 20% en costos de operación, esto debido al decremento en el consumo de kW/h del compresor (ver sección 2.4.) y el control adecuado de los ventiladores del evaporador y condensador, y de las resistencias de deshielo.

Bajo estas especificaciones se espera tener un costo anual de operación de Q. 1 100 144,50.

3.3. Comparación económica

Las variaciones de costos de energía, materiales y demás insumos necesarios para el funcionamiento de un cuarto frío están sujetos a cambios propios del mercado, por ello se toma una tasa de oportunidad de 6% la cual coincide con la tasa de inflación promedio en el país. El análisis realizado tendrá como base de comparación los costos que representan cada una de las propuestas, más no así las retribuciones que estas tengan, asumiendo igual margen de ganancia en el producto, pues en ambas se debe garantizar la misma calidad y cantidad.

En ninguno de los métodos de comparación será tomado en cuenta el valor de salvamento del equipo, pues por ser equipo eléctrico no tendrá ninguna recuperación económica al final de su vida útil. La tabla XI muestra a manera de resumen el costo a considerar en las instalaciones refrigeradas.

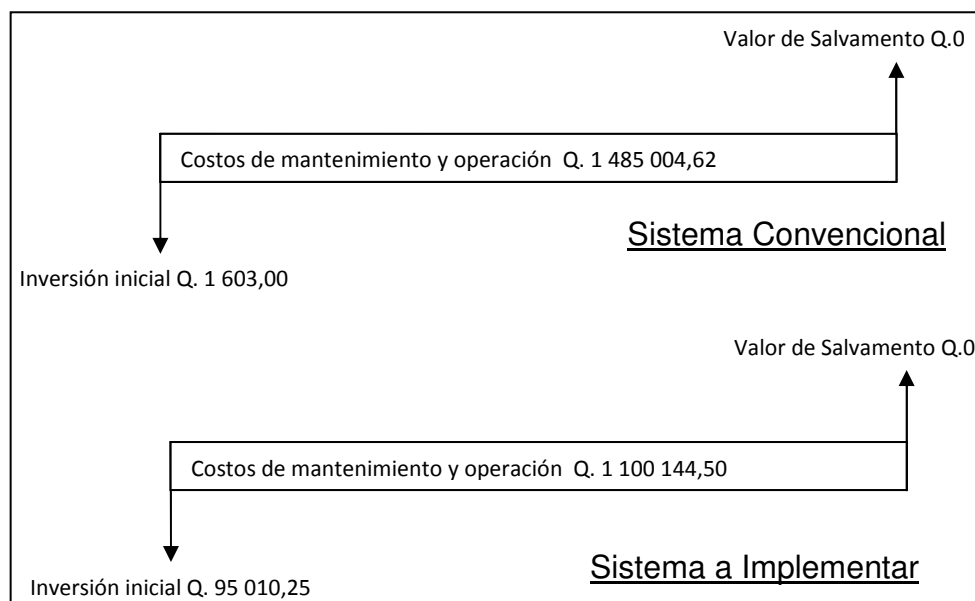
Tabla XI. **Comparación entre costos de sistemas propuestos**

Costos	Inst. Convencional (Q.)	Inst. Automatizada (Q.)
Inversión inicial	1 003,00	50 010,25
Costos de instalación	600,00	45 000,00
Costos de mantenimiento	109 824,00	27 456,00
Costos de operación	1 375 180,62	1 100 144,50

Fuente: elaboración propia.

Para la comparación se toman los datos presentados en la tabla VII. Para el cálculo del VAN, VAUE y TIR se utilizan herramientas de *Microsoft Excel*, cuya explicación de uso está fuera del alcance del trabajo de . En la figura 39 se muestran los diagramas de flujo de caja para cada una de las propuestas.

Figura 39. **Diagramas de flujo de caja**



Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Valor Actual Neto (VAN)

Calcula el valor neto presente de una inversión a partir de una tasa de descuento y una serie de pagos futuros (valores negativos) e ingresos (valores positivos). Descuenta el flujo efectivo de las opciones hacia el presente.

3.3.2. Valor Anual Uniforme Equivalente (VAUE)

Este tipo de análisis compara las inversiones en función del costo equivalente que representaría anualmente cada una de ellas. Distribuyendo así los costos e ingresos en una anualidad.

3.3.3. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Devuelve la tasa interna de retorno de los flujos de caja representados por los números del argumento valores. Estos flujos de caja no tienen por qué ser constantes, como es el caso en una anualidad. Sin embargo, los flujos de caja deben ocurrir en intervalos regulares, como meses o años. La tasa interna de retorno equivale a la tasa de interés producida por un proyecto de inversión con pagos (valores negativos) e ingresos (valores positivos) que ocurren en períodos regulares.

3.3.4. Beneficio - Costo

Se presenta a continuación en la tabla XII los resultados obtenidos en base a los datos recaudados anteriormente. Los resultados del VAN y VAUE, son costos de la inversión, el criterio para la comparación será buscar la opción que menos costos represente para la empresa dueña del cuarto frío.

Tabla XII. **Comparación económica**

Sistema Convencional		Sistema Propuesto	
Datos	Descripción	Datos	Descripción
6%	Tasa de oportunidad	6%	Tasa de oportunidad
5 años	Vida útil del proyecto	5 años	Vida útil del proyecto
Q. 1 603,00	Inversión inicial	Q. 95 010,25	Inversión inicial
Q. 1 485 004,62	Costos de operación	Q. 1 100 144,50	Costos de operación
VAN =	Q. 6 253 776,68	VAN =	Q. 4 539 198,60
VAUE =	Q. 1 485 385,17	VAUE =	Q. 1 122 699,59
TIR =	84%	TIR =	69%

Fuente: elaboración propia.

De lo anterior podemos decir con base a los resultados que para un período de 5 años de análisis, la inversión de automatización, aunque tenga costo inicial más alto, representa costos de producción menores durante el tiempo de vida útil que tenga el proyecto, haciendo una proyección de recuperación de la inversión en un tiempo mucho menor que el sistema convencional.

Si se analiza pensando en el costo anual que representa mantener el proyecto, igualmente la mejor inversión es la opción de automatización pues se requiere menor cantidad de gastos en iguales períodos.

Como valor agregado se ve una mejoría en el factor de potencia, con lo cual se minoraría los pagos por penalización de un factor de potencia bajo.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SCADA

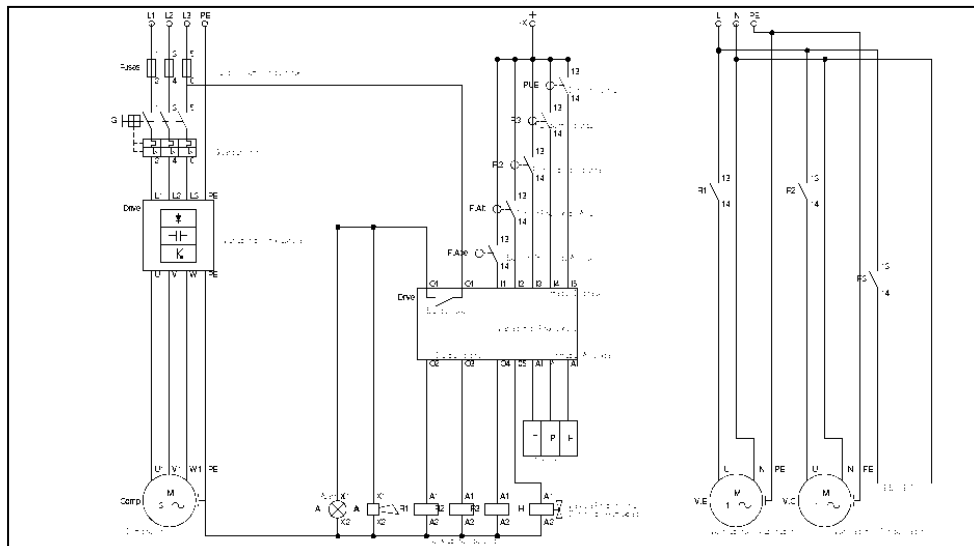
4.1. Instalación del variador de frecuencia

La instalación del variador de frecuencia se divide en dos partes: la instalación física del equipo, lo cual incluye una ubicación adecuada y correcta conexión, y la programación del equipo utilizando herramientas de software.

4.1.1. Instalación física

La conexión física de los equipos, seguirá el orden establecido en el siguiente diagrama eléctrico, figura 40.

Figura 40. Diagrama eléctrico



Fuente: elaboración propia.

El servicio eléctrico existente es de 220 Vac en delta, se utiliza para la alimentación directa del compresor, los ventiladores de compresor y evaporador al igual que las resistencias de deshielo se trabajan con una alimentación de 120 Vac. Los equipos de control van montados en el gabinete de seguridad.

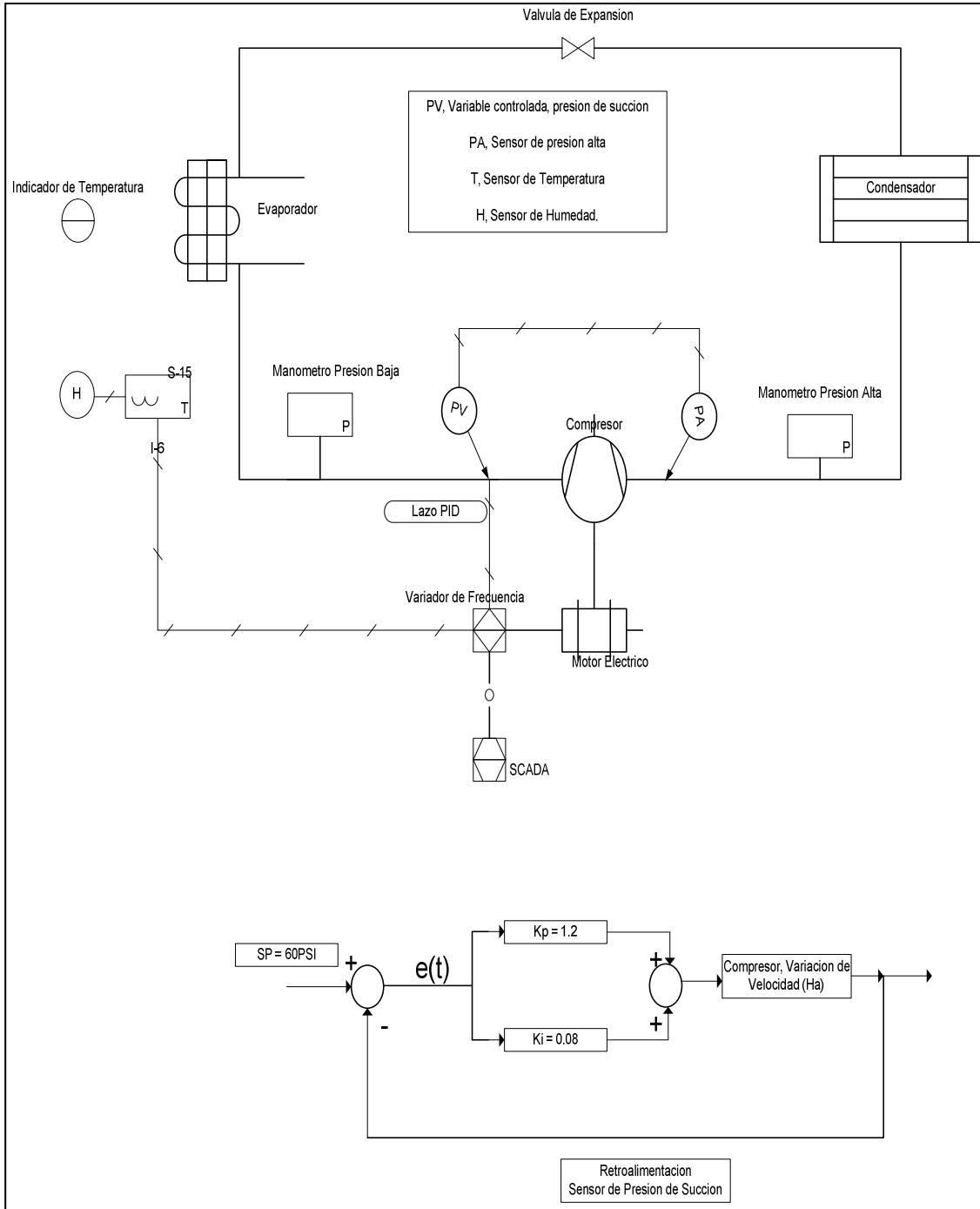
La lógica necesaria para que el control se lleve a cabo estará incluida en la programación del variador y lo necesario para la visualización del funcionamiento de los equipos estará en la programación del sistema SCADA.

4.2. Diseño del sistema de control para ahorro energético

El principal elemento para el lograr el ahorro energético en la operación del cuarto frío es el variador de frecuencia, es por ello que para lograr el control óptimo de éste es el control del variador el que dará los resultados esperados.

En la figura 41 se puede observar el diagrama de control para la estrategia a implementar. En este se aprecia que el lazo PID será retroalimentado por la señal de presión de succión, a su vez el control gobernará al motor del compresor a través del variador de frecuencia, las demás señales entrantes al control son importantes para la supervisión de operación, enviando estos datos por el variador al sistema SCADA. En la parte de abajo del dibujo se encuentra el diagrama de bloques del lazo PI.

Figura 41. Diagrama de control y diagrama de bloques



Fuente: elaboración propia.

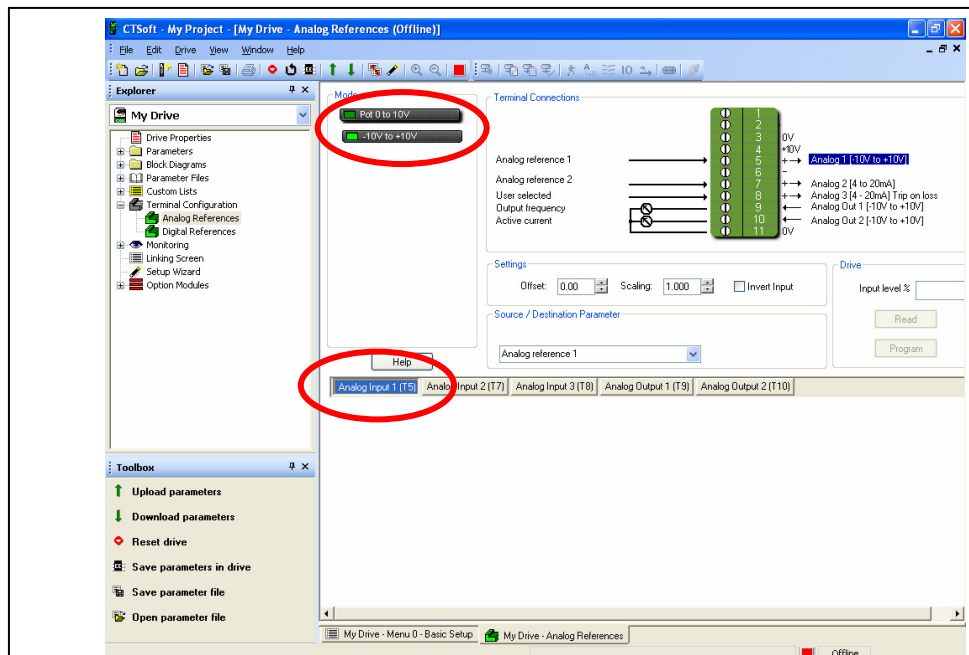
4.2.1. Desarrollo en *software*

El programa que comandará al variador de frecuencia es desarrollando en el *software* de aplicación *CTSoft*, es un *software* con ambiente gráfico que trabaja mediante el direccionamiento de registros, por medio de los cuales se le da órdenes concretas de las tareas a realizar del variador.

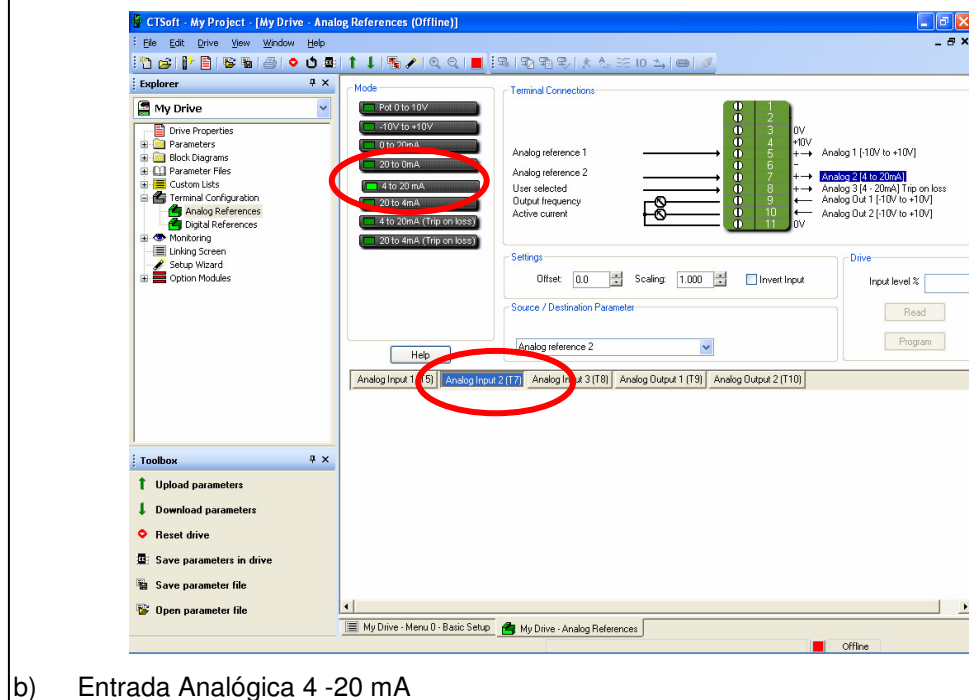
El primer paso es el comisionamiento de las entradas análogas. La primera entrada se declara como entrada de voltaje 0 a 10 Vdc, proveniente del sensor de presión, figura 42 a), en donde se puede apreciar que la primera entrada analógica está en la primera pestaña del menú y la selección del tipo de entrada se hace en la esquina superior izquierda del menú, en donde solo es necesario seleccionar el tipo de entrada mediante un clic del apuntador.

De manera similar la entrada 2 y 3 son lazos de corriente 4 a 20 mA para los sensores de temperatura y humedad, sin importar el orden. En la figura 42 b), se muestra como hacer la selección de estas entradas, basta con seleccionar la pestaña correspondiente a la entrada a configurar y seleccionar el tipo en la lista de la esquina superior izquierda.

Figura 42. Declaración de entradas analógicas

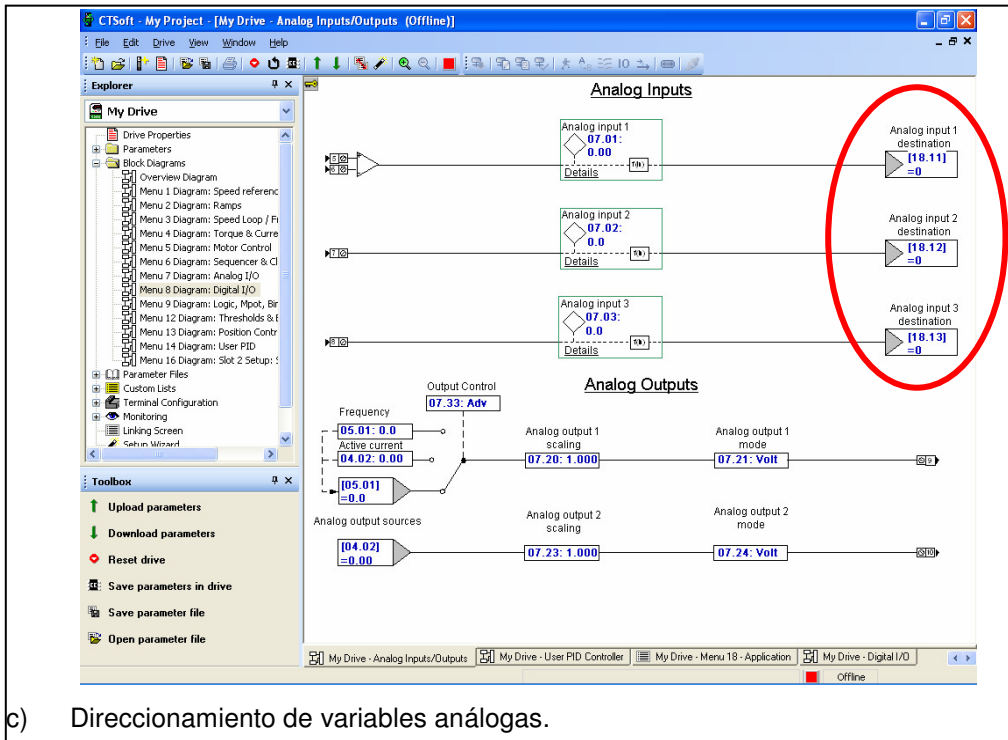


a) Entrada analógica 0 – 10 V.



b) Entrada Analógica 4 -20 mA

Continuación figura 42.



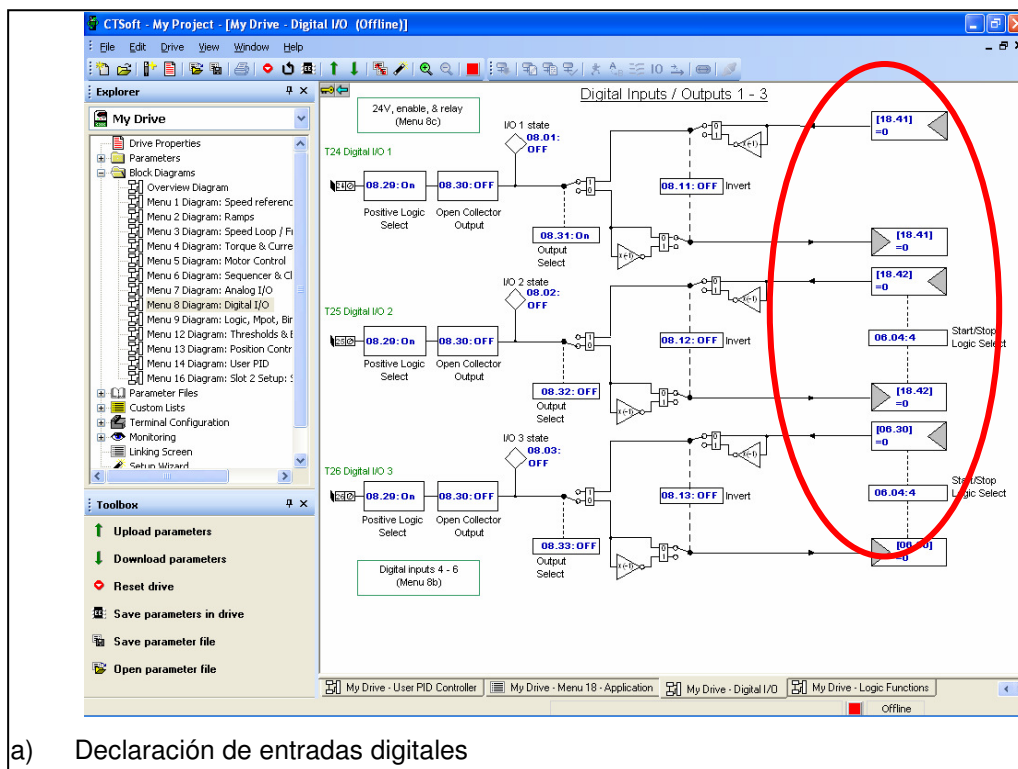
c) Direccionamiento de variables análogas.

Fuente: elaboración propia.

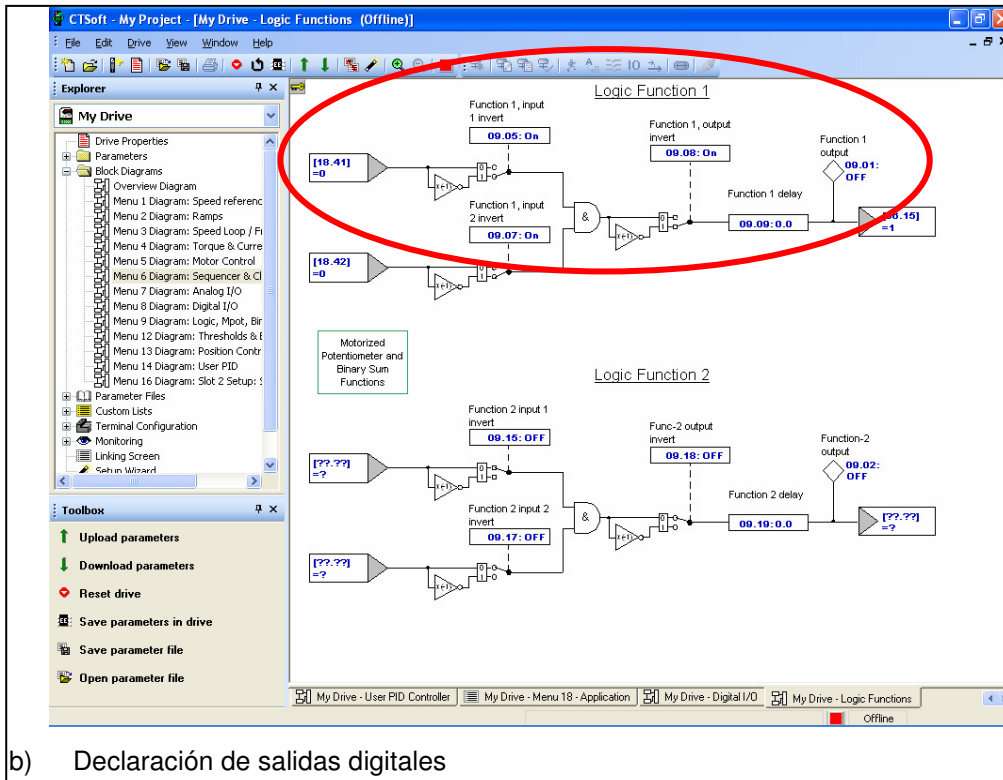
Al terminar con el comisionamiento de entradas analógicas procede el direccionamiento de las variables que podrán ser manipuladas posteriormente, para ello en el menú 7 de entradas y salidas analógicas se buscan los registros 7.01, 7.02 y 7.03 que son las tres entradas disponibles, cada una de ellas está conectada a una salida la cual puede ser direccionada a cualquier registro que el usuario desee, ver figura 42 c). Para cambiar el registro actual de doble clic al registro de salida e ingrese el nuevo registro, se utilizará el menú 18, el número de registro queda a criterio del usuario.

Una vez conectadas las entradas análogas se procede a la conexión de entradas y salidas digitales, es recomendado consultar el manual del equipo para evitar conexiones incorrectas. Al haber instalado correctamente las entradas y salidas se direccionan por medio de *software*. Las entradas de las fichas de dos y tres puntas se direccionan a las salidas de ventiladores de evaporador y resistencia respectivamente. Las entradas de presión de aceite y presión de alta en combinación (Similar a una compuerta *OR*), desconectarán al compresor en caso de falla por funcionamiento anormal, por medio de la inhabilitación de un *bit* de control (*Drive Enable Reg. 6.15*).

Figura 43. Declaración de entradas y salidas digitales



Continuación figura 43.



Fuente: elaboración propia.

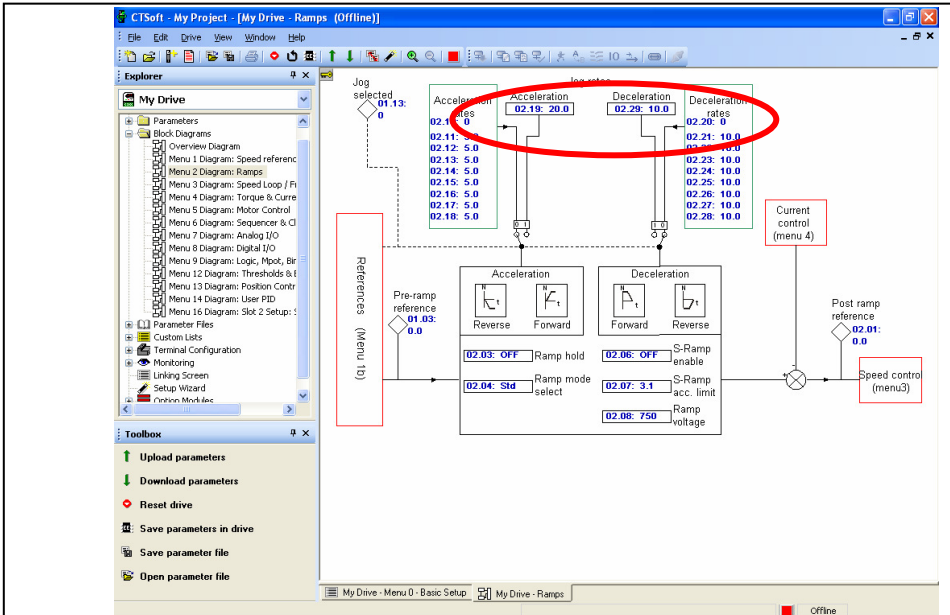
En la figura 43 a) se da un ejemplo de cómo direccionar las entradas digitales, en el menú 8 de entradas digitales seleccione los registros a direccionar de manera similar a lo ya hecho con las entradas análogas, es muy importante entender que el direccionamiento de las entradas depende de manera directa de cómo fueron conectadas físicamente las entradas, es por ello que al buscar el registro de la entrada requerida se debe tomar en cuenta la conexión realizada, abóquese al manual de usuario del variador de frecuencia para más información de la ubicación correcta de las entradas.

Para la salida de uso de compresor se toma en cuenta la temperatura del cuarto y por medio de compuertas lógicas se logra el control directo del motor del compresor, figura 43 b), para ello ubíquese en el menú 6 secuencias de control, el proceso es igual a los ya realizados ingrese las entras al control con doble clic sobre el registro y escriba el nuevo, en este caso el registro de entrada de temperatura, así también cambie las salidas, en este caso será el registro 18.31 que dará la habilitación del control del motor del compresor.

Por último es necesario especificar al variador el tipo de rampa de aceleración y desaceleración que tendrá, para evitar forzar al compresor a un arranque brusco se escoge una rampa de 20 segundos de aceleración y 10 segundos de desaceleración, figura 44 a) en el menú 2 rampas modifique el registro 2.19 dando doble clic al registro e introduciendo el valor de rampa de aceleración que desee, y en el registro 2.29 cambie la rampa de desaceleración.

Se establece la frecuencia mínima y máxima para evitar fallos en el funcionamiento figura 44 b), se debe utilizar una frecuencia mínima de 40 Hz para asegurar el correcto funcionamiento del motor del compresor, pues una frecuencia más baja sería igual a menor cantidad de revoluciones lo que podría llevar al compresor a generar una lubricación insuficiente para sí mismo y debido a que está construido con partes móviles como pistones, rodamientos, bielas etc., esto podría resultar en una elevada fricción entre partes metálicas lo que llevaría al motor a un daño severo por recalentamiento y fundición de sus partes móviles.

Figura 44. Rampa aceleración y desaceleración



a) Selección de rampas

Parameter	Description	Default	Memory	Units
01.00	Parameter 0	0	0	
01.01	Frequency / speed reference selected	0.0	0.0	Hz
01.02	Pre slip filter reference	0.0	0.0	Hz
01.03	Pre ramp reference	0.0	0.0	Hz
01.04	Reference offset	0.0	0.0	Hz
01.06	Jog reference	0.0	0.0	Hz
01.07	Maximum reference clamp	50.0	60.0	Hz
01.08	Minimum reference clamp	0.0	40.0	Hz
01.09	Negative minimum reference clamp enable	OFF	OFF	
01.10	Reference offset select	OFF	OFF	
01.11	Bipolar reference enable	OFF	OFF	
01.12	Reference enabled indicator	OFF	OFF	
01.13	Reverse selected indicator	OFF	OFF	
01.14	Reference selector	ATZ	ATZ	
01.15	Preset reference selector	0	0	
01.16	Preset reference selector timer	10.0	10.0	s
01.17	Keypad control mode reference	0.0	0.0	Hz
01.18	Precision reference coarse	0.0	0.0	Hz
01.19	Precision reference fine	0.000	0.000	Hz
01.20	Precision reference update disable	OFF	OFF	
01.21	Preset reference 1	0.0	0.0	Hz
01.22	Preset reference 2	0.0	0.0	Hz
01.23	Preset reference 3	0.0	0.0	Hz
01.24	Preset reference 4	0.0	0.0	Hz
01.25	Preset reference 5	0.0	0.0	Hz
01.26	Preset reference 6	0.0	0.0	Hz
01.27	Preset reference 7	0.0	0.0	Hz
01.28	Preset reference 8	0.0	0.0	Hz
01.29	Skip reference 1	0.0	0.0	Hz
01.30	Skip reference band 1	0.5	0.5	Hz
01.31	Skip reference 2	0.0	0.0	Hz
01.32	Skip reference band 2	0.5	0.5	Hz
01.33	Skip reference 3	0.0	0.0	Hz
01.34	Skip reference band 3	0.5	0.5	Hz
01.35	Reference in reject zone	OFF	OFF	
01.36	Analog reference 1	0.0	0.0	Hz
01.37	Analog reference 2	0.0	0.0	Hz
01.38	Percentage trim	0.00	0.00	%
01.39	Velocity feed forward	0.0	0.0	Hz
01.40	Velocity feed forward select	OFF	OFF	
01.41	Analog reference 2 select	OFF	OFF	
01.42	Preset reference select	OFF	OFF	
01.43	Keypad reference select	OFF	OFF	
01.44	Resolution reference select	OFF	OFF	

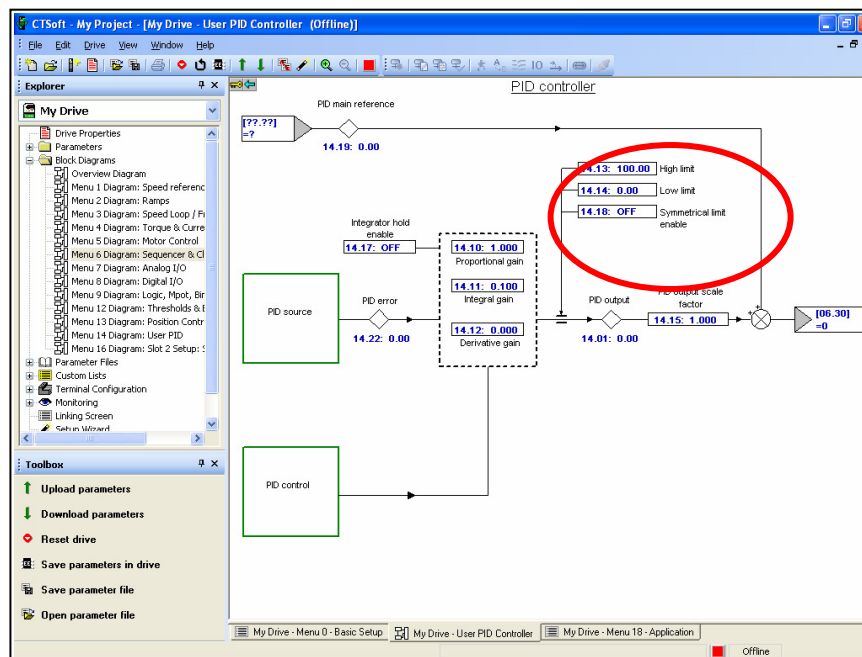
b) Selección de parámetros de frecuencia

Fuente: elaboración propia.

4.2.1.1. Ajuste lazo PID

En el menú de *PID controller* se declaran los valores a considerar, figura 45. En el menú 6 secuencia y control se declara la ganancia proporcional a 1 (registro 14.10), la integral a 0.1 (registro 14.11) y la derivativa se coloca en 0 (registro 14.12), estos son los valores por defecto que podrán ser cambiados después mediante la escritura del registro propio de cada ganancia a través del sistema SCADA. Se declara un límite inferior de 0% y un límite superior de 100% para la salida del *PID Output*, registros 14.13 y 14.14. La manera de escribir estos registros es la misma de los anteriores dando doble clic sobre el registro y escribiendo el nuevo valor.

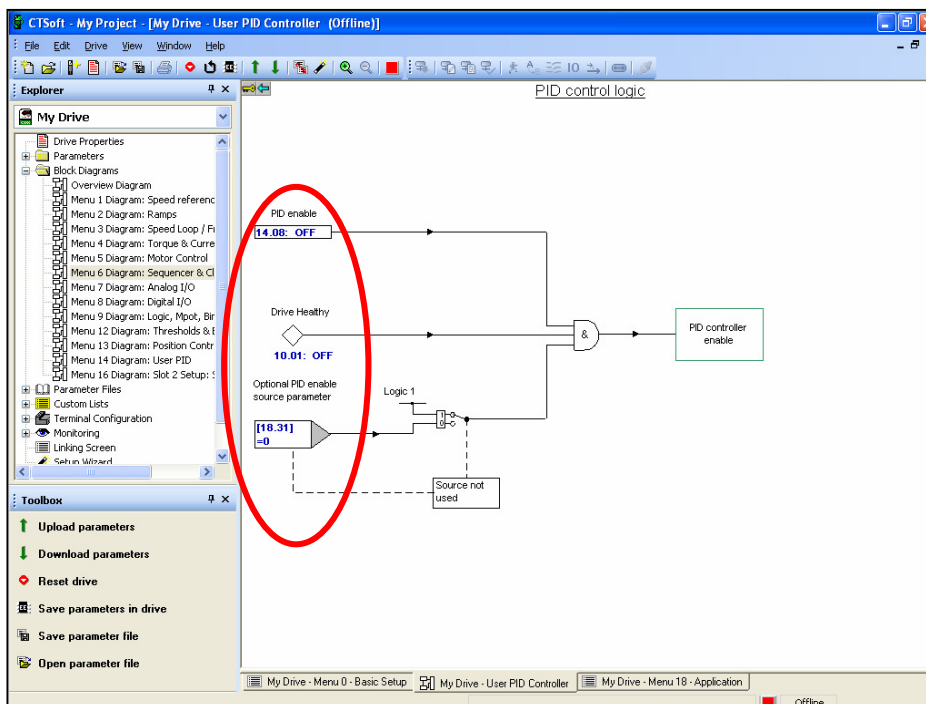
Figura 45. Ajuste de lazos PID



Fuente: elaboración propia.

Para el ajuste del control PID es necesario que tres parámetros estén habilitados, figura 46, de lo contrario el variador deja de funcionar y apaga el compresor. El primero, es un registro para habilitar el PID, 14.08 *PID Enable*, el cual puede ser ajustado a verdadero por defecto o manipulado a través del SCADA, según conveniencia del usuario. El segundo, es un *bit* que asegura el correcto funcionamiento del variador, si el variador sufre alguna anomalía debe desconectarse, esto se logra con el registro 10.01 *Drive Healthy*, este es propio del variador y no se tiene acceso a modificación solo monitoreo. Por último, el arranque y paro por control de temperatura, esta señal proviene del sensor y aquí se especifica mediante la utilización de una variable de usuario 18.31, anteriormente especificado en las salidas digitales.

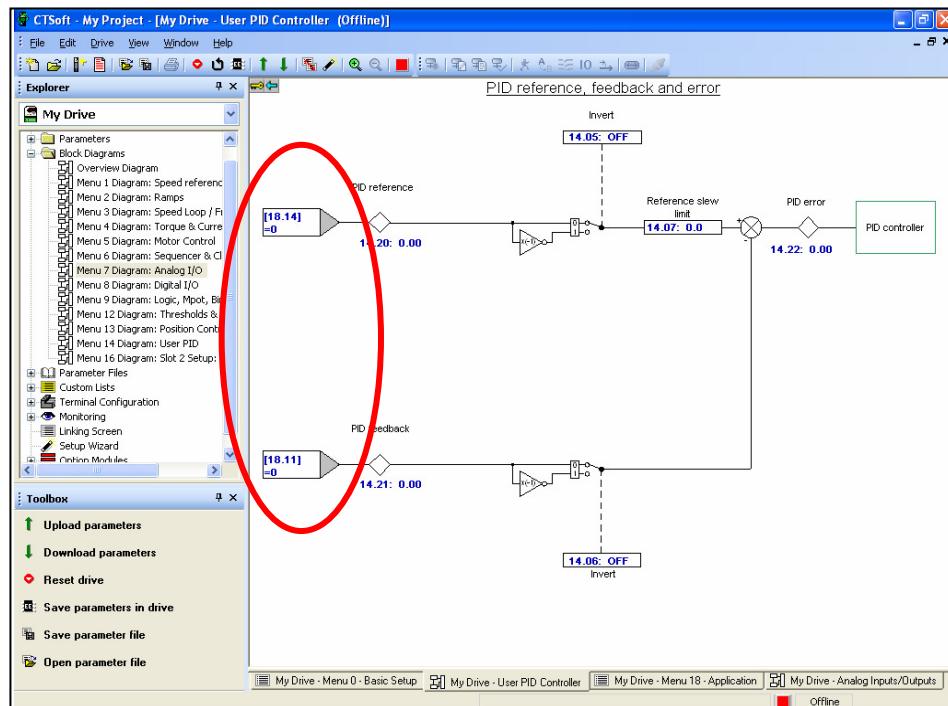
Figura 46. **Habilitación PID**



Fuente: elaboración propia.

Los demás parámetros del control PID se declaran en otra pantalla, figura 47, aquí el *PID reference* es tomado como el *setpoint* del proceso, con una variable (registro 18.14) se podrá cambiar el valor de manera local y remota, originalmente su valor es del 60%, equivalente a 60 psi de medición directa del sensor. El *PID feedback* se direcciona a la entrada analogía uno, entrada de sensor de presión, mediante el registro 18.11 (de nuevo el número de este registro queda a criterio del usuario no está restringido el uso de otro). Los demás parámetros como el *PID error* son solo lectura y se pueden acceder de manera remota pero solo para monitoreo.

Figura 47. **Setpoint y feedback**



Fuente: elaboración propia.

Al terminar la configuración del variador de frecuencia se procede a la prueba de funcionamiento, en la cual se logra el ajuste final de los parámetros del PID. El primer paso es la prueba del sistema con los parámetros por defecto, se observa que el comportamiento no es el esperado, hay oscilación mínima y no se logra la recuperación del sistema en un tiempo adecuado, la respuesta es lenta, así que se procede a la segunda prueba.

En la segunda prueba, el valor de la constante integral se disminuye a un valor de 0,05 y aunque la respuesta se vuelve más rápida no se logra seguir los cambios de la variable con suficiente velocidad, por lo que se aumenta los parámetros de la constante proporcional hasta 1,5, con esto hay demasiadas oscilaciones y después de varias pruebas, el valor de 1,2 para la constante proporcional se adecua bastante bien al comportamiento deseado.

En la salida sigue habiendo oscilaciones y mediante el incremento de la constante integral se logra disminuirlas al grado de ser aceptable el tiempo de respuesta, se logra esto en un valor de 0,08 para la constante integral.

Para finalizar la variable manipulada, presión, no sufre cambios repentinos ni de gran velocidad por lo que de entrada se descartó la opción de un valor para la constante derivativa, pero a manera de prueba se utiliza un valor de 0,01 con lo que se observa que la salida se vuelve inestable y que la respuesta tiene demasiadas oscilaciones, por el resultado de esta prueba la constante se deja en 0.

Así por experimentación se logra concluir un valor de $K_p = 1,2$, $T_i = 0,08$ y $T_d = 0$, por las siguientes razones:

- Se logra la recuperación de la carga sin altas oscilaciones, una constante proporcional más alta haría que el sistema oscile, si es más baja no se logra disminuir el error.
- La constante integral hace que la respuesta del sistema sea efectiva, sin ser muy lenta, ni teniendo oscilaciones.
- No se utiliza control derivativo (siendo un control PI), debido a que la respuesta de la variable es lenta y el cambio de error en el tiempo no es un factor crítico.
- Se implementa un retardo en arranque del compresor de 20 segundos, logrando con esto que el sistema se estabilice antes de que el control proceda a corregirlo. Esto debido a que es necesario esperar que la rampa de arranque haya pasado antes de empezar a calcular la corrección, de lo contrario la corrección sería errónea al encontrar que durante el arranque el cambio del error (dado el crecimiento de frecuencia y por consiguiente el decremento de la presión de succión) es muy grande.

4.2.2. Límites de operación y seguridades

El correcto funcionamiento del cuarto frío, así como su vida útil, dependerá además de la calidad de los insumos utilizados y la manufactura del mismo, de la responsabilidad con la que se opere. Para garantizar que el sistema trabajará dentro de un rango en el que no represente un riesgo la operación se cuentan con seguridades físicas y de *software* para evitar daños en el equipo:

Físicas:

- Interruptor termomagnético, para la protección en las instalaciones eléctricas de potencia.
- Guardamotor (interconstruido al variador), para proteger al motor del compresor contra pérdidas de fase, sobrecorrientes, cortocircuitos, entre otros.
- Se conserva la protección por sobrepresión del sistema convencional, lográndolo con un transductor colocado en el lado de presión del condensador.
- Se conserva la protección contra pérdida de lubricación mediante un dispositivo electromecánico (medidor de presión de aceite) que desconecte el compresor en caso de esta anomalía.

Software:

- Por el tipo de compresor utilizado (semi-hermético), es peligroso trabajar con revoluciones muy bajas, puesto que sería imposible la lubricación del mismo, causando daños al compresor anteriormente mencionados. Es por eso que se restringe la frecuencia del voltaje de alimentación a una no menor a 40Hz, este límite no puede ser cambiado por el usuario y garantiza la correcta lubricación del compresor.

- Para evitar el desgaste del compresor al arrancar o detenerse con carga se ha planteado una rampa de aceleración lo suficientemente lenta como para lograr compensar la carga máxima sin forzar al motor y una desaceleración que prevenga de las paradas bruscas. Estas son de 20 y 10 segundos respectivamente.
- Se habilita la protección interna del variador de frecuencia (*Drive Healty* registro 10.01) que desconectará al variador y al motor del compresor en caso de cualquier falla eléctrica.

Es importante mencionar que la temperatura de operación está en base al producto que se desea conservar y que esta puede ser seleccionada por el operador, pero queda a su criterio el valor de dicha temperatura siendo ajeno el sistema de control a la selección de la misma. Así también las temperaturas mínimas y máximas están en función de los materiales y en si la construcción del cuarto frío por lo que el sistema hará las correcciones pertinentes para trabajar lo más eficientemente posible, pero es imposible que se pretenda que trabaja en parámetros fuera de los limitados propios del diseño.

Por último, aunque el sistema cuenta con un parámetro que supervisa el funcionamiento del variador (*Drive Healty*), es responsabilidad del usuario atender el uso correcto del variador y no sobrecargar el sistema por mala operación o malas instalaciones, por ejemplo mantener la puerta abierta durante largos períodos de tiempo o trabajar con empaques defectuosos en la puerta del cuarto.

4.2.3. Alcances del control

El sistema está compuesto por un compresor semi-hermético de 3Hp trifásico 240V alimentado en delta a 60Hz, para el control fue utilizado un variador de frecuencia de la misma capacidad (en Hp). El cuarto frío es utilizado para el sostenimiento del producto y no para congelación.

El tipo de compresor y el refrigerante utilizado restringen la velocidad mínima a la que se puede llevar el motor eléctrico. Por su construcción el compresor tipo reciprocante también se presta para este tipo de control, siempre y cuando no se opere a una velocidad demasiado baja que provoque daños a los elementos en movimiento del compresor, queda en el implementador del sistema la correcta selección de velocidad para la operación, en caso de duda se recomienda ponerse en contacto con el fabricante.

En cuanto a capacidades de Hp se debe tomar en cuenta que en cuanto más crezca el motor, en esa misma proporción deberá crecer el variador de frecuencia, así que la restricción de potencia está sujeta a la disponibilidad del variador de frecuencia adecuado y no tanto a la capacidad del motor.

Es de mencionar que el sistema propuesto es sólo una forma de resolver el problema y que puede prestarse para mejoras más allá de las que aquí se mencionan, por ejemplo, es posible combinarlo con sistemas mecánicos que mejoran la operación de la válvula de expansión, mejorando así el consumo de energía y logrando llegar a la temperatura deseada más rápido.

Es posible utilizar sistemas electrónicos que lo hagan más eficaz, como un arrancador suave en combinación a elementos de protección para el remplazo de los variadores de frecuencia y así hacer el sistema más económico, pero en casos de pequeña potencia (menos de 15 Hp) como lo es este, la solución del arrancador suave resulta ser muy cara o en algunos casos no es viable.

Como último punto el sistema de control es tan versátil que fue utilizado para pruebas en un sistema de aire acondicionado de pequeña potencia (3Hp) que presenta similitudes de operación con un cuarto frío logrando resultados prometedores en el ahorro de energía, por lo que es oportuno mencionar la posibilidad de investigar el funcionamiento del control en sistemas de aire acondicionado y así determinar si es apto para ello o no.

4.2.4. OPC Server

El OLE (*Object Linking and Embedding*, cuya traducción en español sería incrustación y enlazado de objeto) para control de procesos (OPC, por sus siglas en inglés *OLE Process Control*), es un estándar abierto para compartir datos entre dispositivos de campo y aplicaciones de ordenador. Permite a las aplicaciones leer y escribir valores de proceso, y que los datos sean compartidos fácilmente en una red de ordenadores. El estándar es de dominio público y disponible para cualquiera que quiera usarlo.

Tradicionalmente, los fabricantes de *software* desarrollan *drivers* específicos para cada tipo de *hardware* al que querían acceder. Con *OPC*, los fabricantes de *hardware* sólo preparan un conjunto de componentes de *software* para que los clientes los utilicen en sus aplicaciones.

Los desarrolladores de *software* no rescriben los *drivers* debido a nuevas versiones de *hardware* así los usuarios finales tendrán muchas más alternativas de integrar distintos sistemas.

4.2.4.1. Funcionamiento

Una aplicación *OPC*, como cualquier otra aplicación *OLE* o *DDE* (por sus siglas en inglés *Dynamic Data Exchange*, que en español significa intercambio de datos dinámico), constará de servidores y clientes *OPC*. Cada cliente, es decir, cada aplicación de usuario o SCADA interroga al servidor que contiene los datos que necesita.

Los servidores están organizados en grupos y cada grupo puede contener distintos ítems. Las diferentes partes de la aplicación (*displays* de operador, informes, entre otros) pueden usar distintos grupos, los cuales pueden tener distinta frecuencia de refresco y pueden ser de acceso secuencial o basado en excepciones (eventos). Los ítems representan conexiones a fuentes de datos dentro del servidor (variables de proceso). A cada ítem se asocia un valor (valor de la variable de proceso), un calificador (estado de la variable, *OK*, bajo rango, u otra) y una marca de tiempo.

Para la realización de la conexión de los equipos con el sistema SCADA a implementar, se utilizará un *OPC Server* proporcionado por la marca de variador de frecuencia propuesto, su configuración y utilización serán descritos en el apartado posterior.

4.2.4.2. Desarrollo de la conexión de variador – CPU

El primer paso es la configuración de variables a utilizar, especificando si las mismas serán utilizadas como escritura, lectura o escritura-lectura. Además es importante establecer qué tipo de variable es la que se va a utilizar, siendo esta un *bit*, entero de ocho *bits*, entero de 16 *bits*, etc. Para esto se utiliza el *Adress space tool* aplicación que corre en *Microsoft Excel*, ver figura 48.

Figura 48. Adición de variables a monitorear (*OPC Server*)

	A	B	C	D	F	G	H	I	J	K
	Node Address	Node Type	Param address	Type code	Range	Default	Units	N of DP	User Node Name (Optional)	User Menu
1										
2	1	UnidriveSP closed loop	100	3	32767			0		
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										

Fuente: elaboración propia.

En la ventana abierta (figura anterior) situarse en uno de los espacios en blanco en la primera columna, luego dar clic en el ícono de *Build namespace data* (ícono uno de la figura 48), aparecerá la siguiente ventana donde se agregan todas las variables y registros que se desea monitorear, ver figura 49. Para agregar los datos sólo llenar la información que se pide:

- *Select Protocol*: se refiere al protocolo de comunicación a utilizar.
- *Enter Address*: es la dirección del nodo, y si lo amerita el puerto y sub nodo que está utilizando.
- *Choose node type*: selecciona el modelo y serie del equipo.
- *Choose menú*: escoge el menú en el cual se encuentra el registro que desea agregar, por *default* esta seleccionado *All menus* el cual incluye todos los menús.
- *Choose parameter*: escoge específicamente un parámetro para agregar. Por *default* se encuentra seleccionado *All menus parameters*, este incluye todos los parámetros de todos los menús que incluye el variador.
- *Add the parameter(s)*: al darle clic al botón este incluye los parámetros que hayamos seleccionado previamente.
- *Mistakes!*: *Undo* deshace la última acción; *Remove* remueve el último parámetro agregado; *Clear sheet* limpia la hoja de todos los parámetros incluidos; *Finished* termina la acción y sale de esta ventana.

Figura 49. Ventana de edición de parámetros

Build sheet from drive data

1. Select protocol: CT-RTU (range 1 - 247 + routing)

2. Enter address: Node address: 1
Slot: Sub node:

3. Choose node type: UnidriveSP closed loop

4. Choose menu: All menus

5. Choose parameter: All menu params

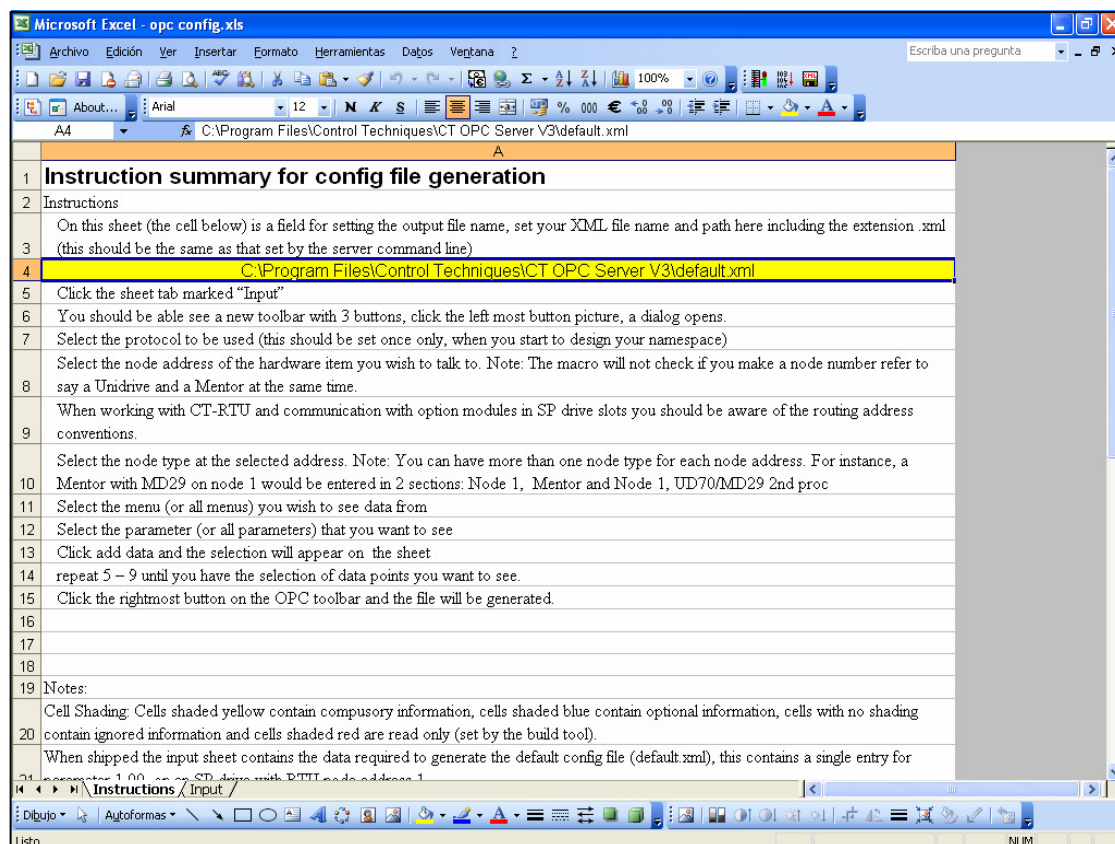
6. Add the parameter(s): Add data

Mistakes! Undo Remove Clear sheet Finished

Fuente: elaboración propia.

Ahora en la hoja *Instructions summary for config file generation* cambiar la dirección que está predeterminada por la dirección en donde se desea guardar el archivo que creará esta aplicación. Y por último dar clic en el ícono *Generate namespace file* (ícono dos en la figura 48), debe hacerse de la manera que se muestra en la figura 50.

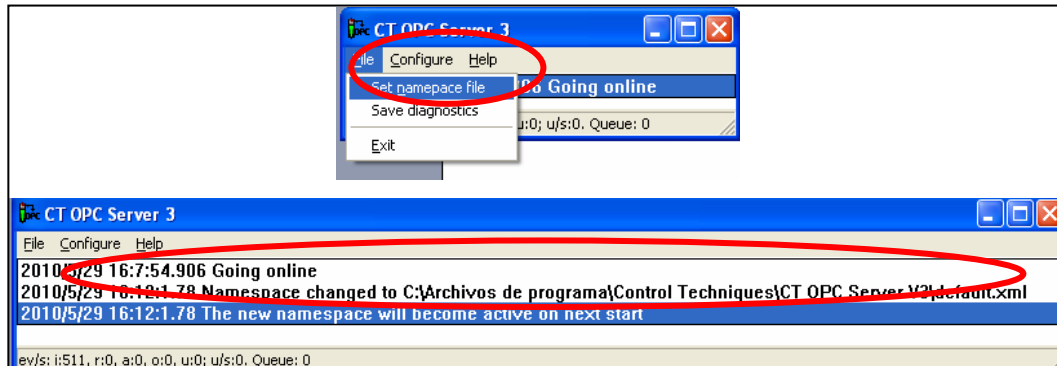
Figura 50. Guardar datos



Fuente: elaboración propia.

Por último se necesita cargar el archivo al *OPC Server*, y dejarlo funcionar, para esto se debe abrir el *CT OPC Server V3*, figura 51. Dar clic en *File*, luego en *Set namespace file*, se abrirá una ventana de búsqueda de archivo, buscar y abrir el archivo creado con los parámetros que se desea incluir, y éste desplegará un mensaje en donde se lee que se cierre y se abra el programa de nuevo para que se carguen los archivos.

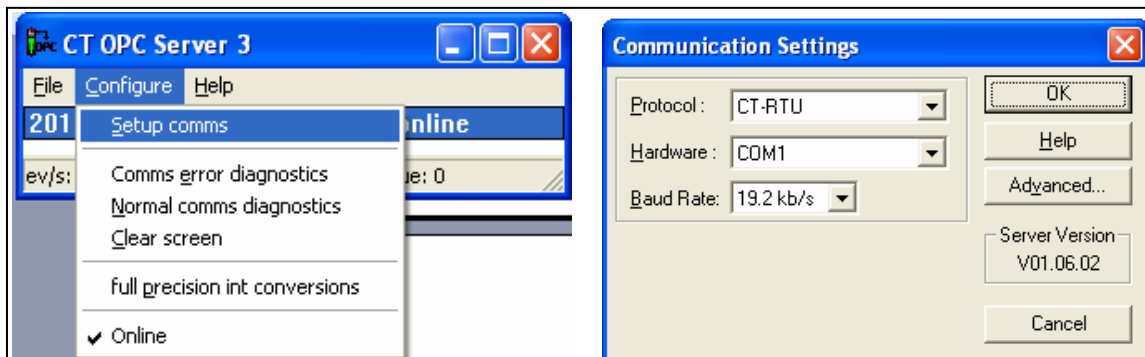
Figura 51. Ventana **OPC Server**



Fuente: elaboración propia.

Verificar las opciones de comunicación en *Configure, Setup comms*, debe aparecer la siguiente ventana donde se debe especificar el puerto de conexión, el protocolo de comunicación y la velocidad en baudios a trabajar, figura 52. Una vez terminada la configuración aparecerá un mensaje diciendo que la configuración tomará efecto a la siguiente vez que se inicie el programa. Esto se puede hacer simultáneamente con el paso anterior para ganar tiempo.

Figura 52. Configuración de comunicación **OPC Server**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Instrumentación virtual (LabVIEW)

La rápida adopción de la PC en los últimos 20 años generó una revolución en la instrumentación de ensayos, mediciones y automatización. Un importante desarrollo resultante de la ubicuidad de la PC es el concepto de instrumentación virtual, el cual ofrece variados beneficios a ingenieros y científicos que requieran mayor productividad, precisión y rendimiento.

Un instrumento virtual consiste de una computadora, o una estación de trabajo, equipada con programas (*software*), *hardware*, y manejadores (*drivers*) que cumplen, en conjunto, las funciones de instrumentos tradicionales. Los instrumentos virtuales representan un apartamiento fundamental de los sistemas de instrumentación basados en el hardware a sistemas centrados en el software que aprovechan la potencia de cálculo, productividad, exhibición y capacidad de conexión de las computadoras.

Aunque la PC y la tecnología de circuitos integrados han experimentado avances significativos en las últimas dos décadas, es el *software* el que realmente provee la ventaja para construir sobre esta base de *hardware* para crear los instrumentos virtuales, proveyendo mejores maneras de innovar y de reducir los costos significativamente.

LabVIEW es un entorno de programación gráfica usado para desarrollar sistemas de medida, pruebas y control usando íconos gráficos y cables que parecen un diagrama de flujo. Posee dispositivos de *hardware* y brinda bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual.

4.3.1. Adquisición de datos en tiempo real

Consiste en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecúa la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital.

La adquisición de datos se inicia con el fenómeno físico o la propiedad física de un objeto que se desea medir. Esta propiedad física o fenómeno podría ser el cambio de temperatura o la temperatura de una habitación, la intensidad o intensidad del cambio de una fuente de luz, la presión dentro de una cámara, la fuerza aplicada a un objeto, etc. Un eficaz sistema de adquisición de datos pueden medir todos estos diferentes fenómenos. Un sensor transformará esta magnitud física en señales eléctricas (tensión o corriente) las cuales serán utilizadas para conocer el comportamiento en el interior de sistema.

Los sensores serán conectados directamente al variador de frecuencia, prefiriendo la conexión al equipo debido a que el control estará en él y el sistema SCADA servirá para supervisión y presentación adecuada de los datos. Esto se hace debido a que, si los sensores estuvieran conectados directamente al sistema supervisorio, una falla en la comunicación podría detener el proceso, y ante esta situación es preferible perder la visualización a perder el control.

4.3.2. Análisis y procesamiento de datos

Una vez obtenidos los datos que son necesarios para establecer el control propuesto, se procede al procesamiento de los mismos. El primer paso es establecer un escalamiento adecuado para poder interpretar de manera correcta las señales que los sensores nos están proporcionando, para esto es recomendable abocarse a las hojas de datos de fabricantes.

En este caso en particular la salida del sensor de presión es de 0 a 5 Vdc para presiones de 0 a 100 psi, el programa establece un escalamiento de 0 a 100% por defecto, por lo que es importante conocer el comportamiento de la señal que proporciona el sensor.

En esta aplicación se da el fenómeno de que la presión de succión en el sistema es igual o mayor de 100 psi al inicio, al entrar a funcionar el compresor ésta baja paulatinamente, por lo que es preciso definir en la programación una retroalimentación inversa para que el control PID tenga efecto.

Por otro lado el control de temperatura tiene una salida de 4 a 20 mA, se usa un escalamiento similar al de la presión 0 a 100% utilizando éste valor de forma parecida, con la diferencia de que éste se necesita saber cuándo ha pasado de un valor superior e inferior determinado. Se presenta la misma situación con el sensor de humedad.

4.3.3. Módulo DSC

El módulo DSC (*Datalogging and Supervisory Control*) de LabVIEW consta de una serie de herramientas de programación utilizadas para la creación de pantallas de monitoreo, con el fin de hacer que el usuario final trabaje en un ambiente amigable, altamente gráfico y de simple manejo.

4.3.3.1. Visualización

La visualización con el módulo DSC se logra utilizando imágenes fijas o en movimiento, dando así la sensación de poder visualizar el proceso que se está llevando a cabo en la comodidad de una computadora. Será responsabilidad del desarrollador adaptar todo tipo de imágenes, sonidos y video para hacer que la supervisión desde una pantalla sea cómoda, práctica y funcional. Queda entonces la magnitud de los sistemas SCADA restringida a limitaciones de recursos propios del programador.

4.3.3.2. Alarmas y eventos

Es importante, antes de entrar al desarrollo de la programación, conocer la diferencia entre alarma y evento. La alarma es una anomalía en el sistema, solo ocurre cuando algo fuera de lo común está sucediendo, por ejemplo un corto circuito, una temperatura arriba del rango permitido, entre otros. El evento es un cambio de estado que no representa necesariamente una falla, por ejemplo, si una luz encendida se apaga, o viceversa; un termómetro está marcando 26 °C y cambia a 27 °C, no representa una falla sólo un cambio.

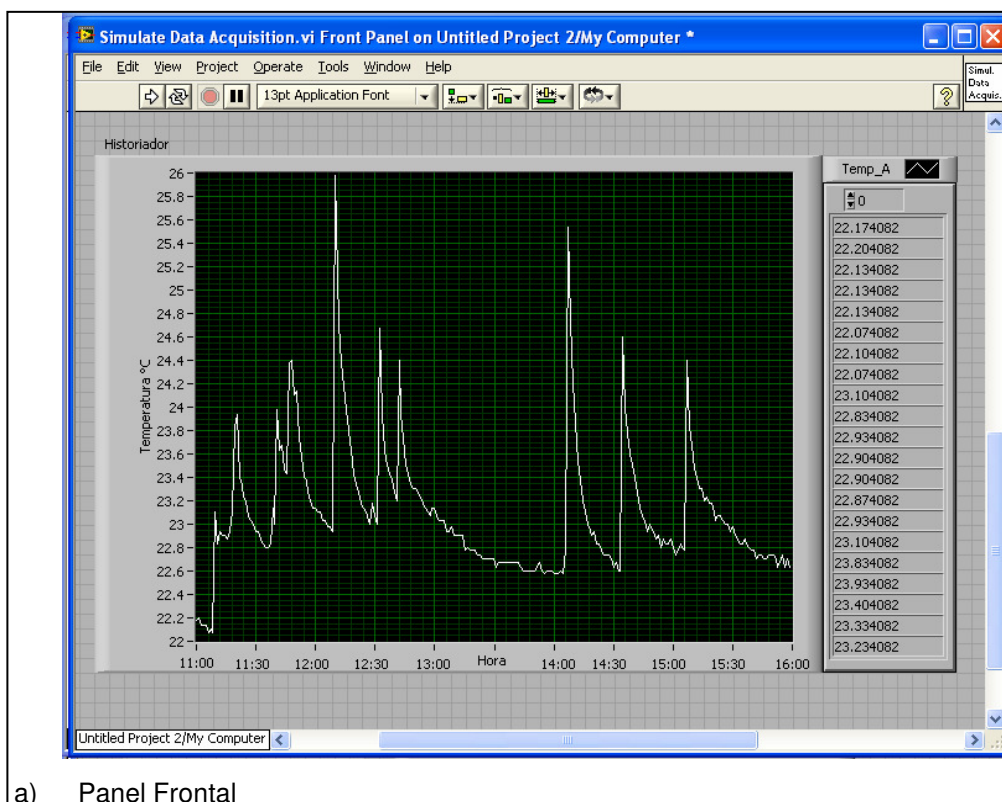
En una misma variable a controlar pueden existir conjuntamente una alarma y un evento, por ejemplo si estamos midiendo nivel de agua en un tanque y tenemos un límite inferior de ocho litros, cuando el nivel cambie de ocho a siete litros se producirá una alarma por escasez de agua y a la vez se produce un evento por el cambio de valor en la medición. Lo primordial es saber seleccionar la operación correcta cuando sea necesaria, o la combinación de ambos.

En LabVIEW las alarmas y eventos son una propiedad configurable de la variable compartida, por lo que es necesaria la creación de esta para poder trabajar con alarmas y eventos.

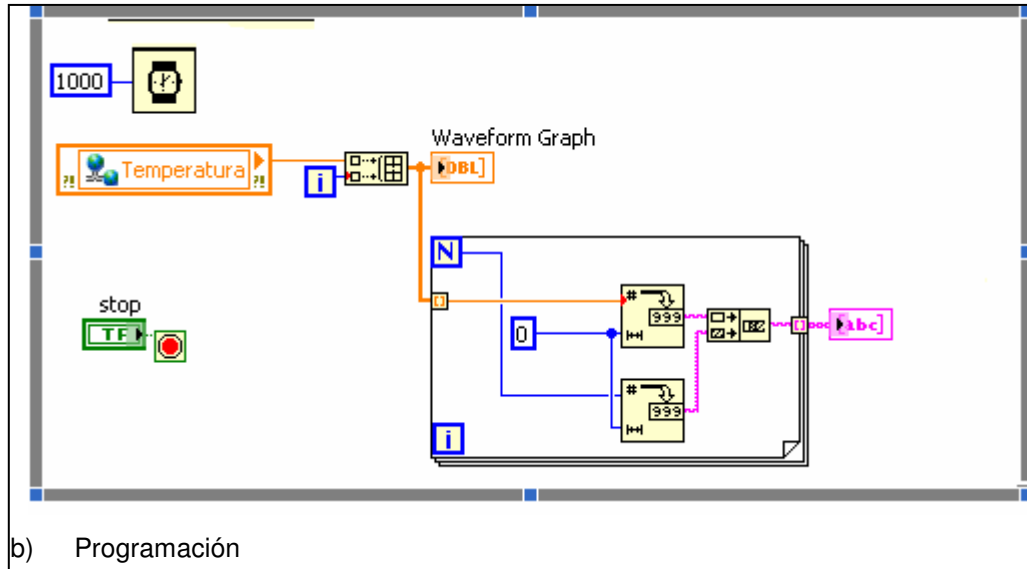
4.3.3.3. Historiadores

Los historiadores permiten conocer el comportamiento de una variable con relación a la hora y fecha de su operación, y presentar esta información de manera gráfica y/o tabulada para que el usuario reduzca tiempo de trabajo. Por ejemplo, se necesita conocer el cambio de temperatura en un intervalo del día.

Figura 53. **Historiadores**



Continuación figura 53.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 53 a) se muestra el panel frontal al cual tendrá acceso el usuario final, se prefiere que sea lo más gráfico y sencillo posible. En la figura 53 b) se muestra el código de programación, en ésta se puede observar que los datos son tomados de una variable compartida cada segundo, puesto que la temperatura no es de variación rápida, y que son procesados a través de un ciclo *for* de manera que tabula y despliega los datos de la manera en que van entrando.

4.3.3.4. Gráficas

La representación gráfica de los datos es más asimilable, rápida y clara que las tabulaciones hechas a mano por operarios que registran el comportamiento en un sistema.

El sistema SCADA muestra gráficas de las variables más importantes a monitorear, permitiéndole al operador acceder a la información en cualquier momento que lo requiera. En la figura 53 se muestra un ejemplo de cómo las gráficas reducen la información tabulada a una imagen.

4.3.3.5. Seguridad (usuarios y contraseñas)

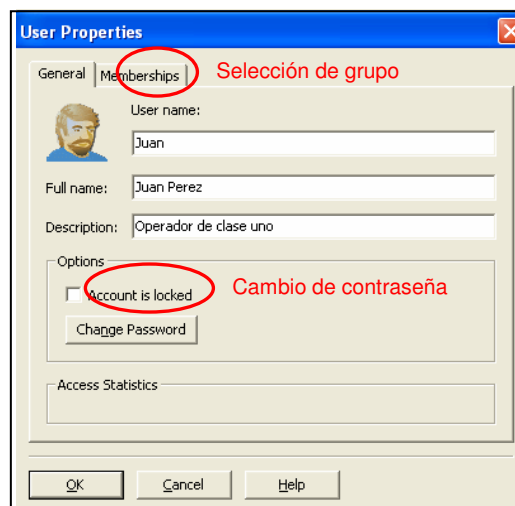
En una red donde la información viaja a través de varios equipos y múltiples usuarios tienen acceso a ella, es necesario asegurar la privacidad de aspectos que sólo son aptos para trabajadores de la empresa. Así también estandarizar prioridades en cuanto a los parámetros que son permitidos a monitorear dependiendo de jerarquías de operación. En base a esto el *software* trabaja con tres tipos de usuarios:

- Administrador: usuario del área administrativa y gerencial. Acceso total.
- Mantenimiento: jefe de mantenimiento y colaboradores. Permitido cambiar parámetros propios a su área.
- Operador: usuario de planta. Acceso restringido, no se le permite cambiar parámetros, sólo supervisión.

Para crear un nuevo usuario y establecer su jerarquía seguir los siguientes pasos: en la ventana del proyecto seleccionar el menú *Tools*, submenú *Security* y abrir el *Domain Account Manager*. En la ventana de administración de dominios seleccionar *File, New, Local Domain* seleccionar un nombre y contraseña para su dominio. Seguido a esto crear un grupo, abrir el menú *File, New, Group*, escoger un nombre y descripción para el grupo.

Por último, la creación de un usuario es un proceso similar, abrir *File, New, User*, llenar los campos que aparecen en la ventana, figura 54, y seleccionar el grupo al cual pertenece el nuevo usuario. Cambiar la contraseña, si es necesario.

Figura 54. Creación de usuarios



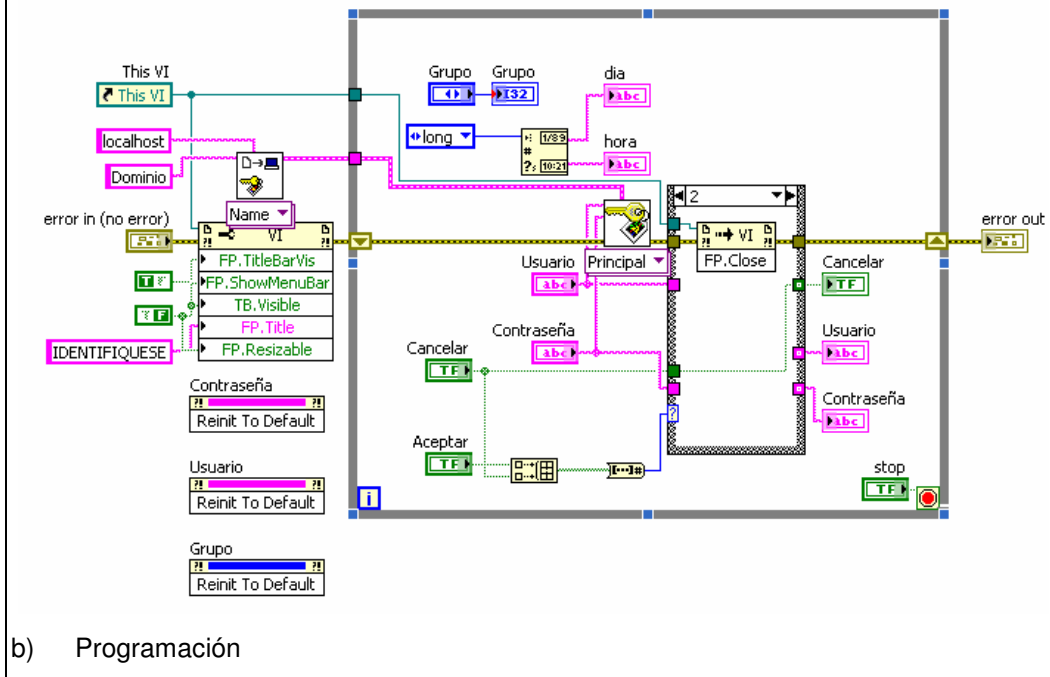
Fuente: elaboración propia.

Ya creada la cantidad de usuarios necesarios y organizados en los grupos, se necesita restringir el acceso, en la figura 55 se muestra la pantalla de acceso y la programación para esto. Es necesario que se ejecute un programa siempre al empezar la aplicación, este programa controla el acceso con un *bit* de verificación, el cual será uno si el usuario se ha identificado correctamente y corresponde al grupo que ha seleccionado, o cero si cualquiera de los datos no coincide con los que están guardados en el sistema.

Figura 55. Pantalla de acceso a usuarios



a) Panel frontal



b) Programación

Fuente: elaboración propia.

En la figura 55 a) se muestra la pantalla de acceso al programa de monitoreo, cuenta con los parámetros básicos de identificación, grupo se refiere a la jerarquía a la cual pertenece, y el usuario y contraseña son únicos para cada persona que opere el programa.

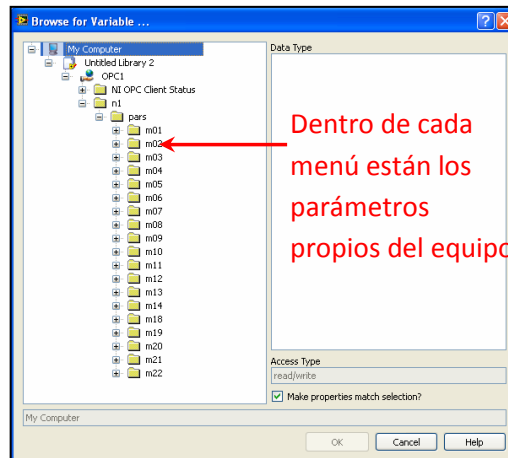
En la figura 55 b) está la programación de la pantalla de entrada, ésta se basa en la creación de usuarios realizada por el programador previamente y básicamente se trata de comparar el nombre, clave y grupo que escribe un usuario con los ya existentes, dándole acceso o denegándolo por incompatibilidad de información.

4.3.3.6. Variables compartidas

Antes de empezar con la creación de pantallas para la visualización de los datos, se debe lograr ligar los datos obtenidos en los equipos a LabVIEW, para ello usamos variables compartidas asociadas al *OPC Server* del variador.

El procedimiento es el siguiente: en la ventana de proyecto dar clic inverso a *My computer* y seleccionar *New, I/O Server*, seleccionar *OPC Client*, éste dará los parámetros necesarios para solicitar los datos al servidor del equipo, si es necesario seleccionar entre la lista el servidor del equipo, si la maquina sólo se tiene un servidor éste está seleccionado por *default*. Una vez agregado el servidor, dar clic inverso en la librería donde se encuentra, agregar una nueva variable en, *New, Variable*, en la ventana de selección de variable habilitar el *checkbox Enable Alaising* y buscar en la ventana *Browse for Variable*, figura 56, el registro del equipo que se ligará a la variable compartida.

Figura 56. **Variables compartidas**



Fuente: elaboración propia.

Después de agregar las variables, ya están listas para ser utilizadas dentro de la programación y agregarle las propiedades anteriormente vistas que sean requeridas por el usuario final.

4.3.4. **Diseño del sistema SCADA**

Una vez terminada la instalación del variador de frecuencia, tanto física como de software, se procede a la programación del sistema SCADA, se utilizará LabVIEW como software para el desarrollo, y una computadora de escritorio con los requerimientos mínimos solicitados por el *software*.

Las herramientas necesarias para el diseño han sido expuestas anteriormente, este conocimiento se complementa con el criterio que tenga el desarrollador del programa.

4.3.4.1. Pantalla inicial

En la figura 55, se muestra la pantalla de inicio del programa. Ésta es la encargada de obtener la información del usuario, otorgar o denegar el acceso del mismo. La información solicitada en esta pantalla no sólo es usada con motivos de seguridad, sino que es necesario conocer quién es el usuario, para identificarlo adecuadamente en los reportes que haga el programa.

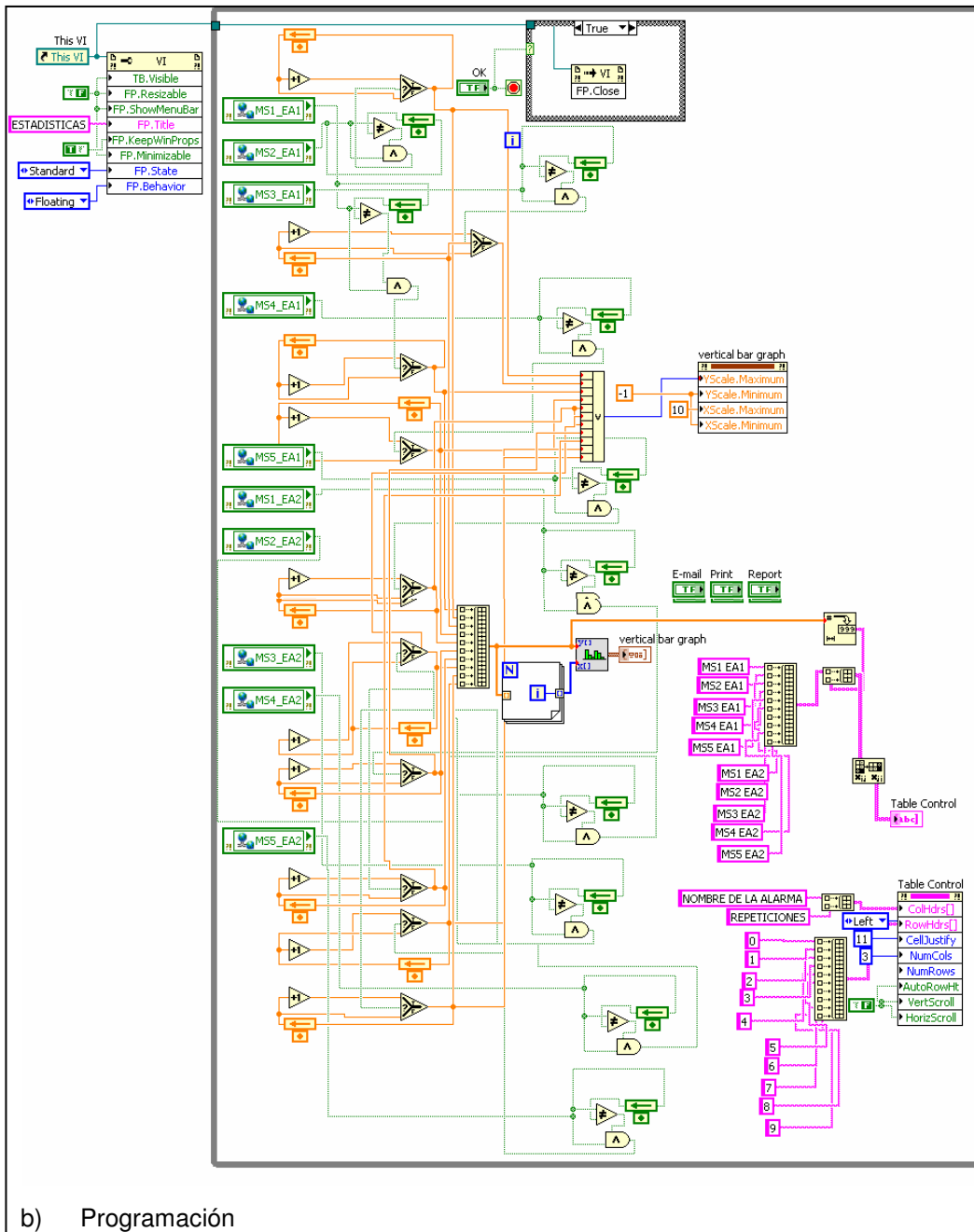
4.3.4.2. Pantalla de histogramas

Toda alarma que tenga lugar durante el funcionamiento del sistema, será procesada, mostrada al operador en una ventana especial e incluida en los reportes que el mismo programa genera. La frecuencia con que se da una alarma y la repetición de la misma alarma se analizará con un enfoque estadístico. Para presentar estos resultados, se cuenta con una pantalla de histograma que mostrará los datos de forma tabulada y por medio de una representación gráfica. En esta pantalla se incluyen las funciones de reportes e impresión. En la figura 57 a) se muestra la pantalla.

Figura 57. **Pantalla y programación de histograma**



Continuación figura 57.



b) Programación

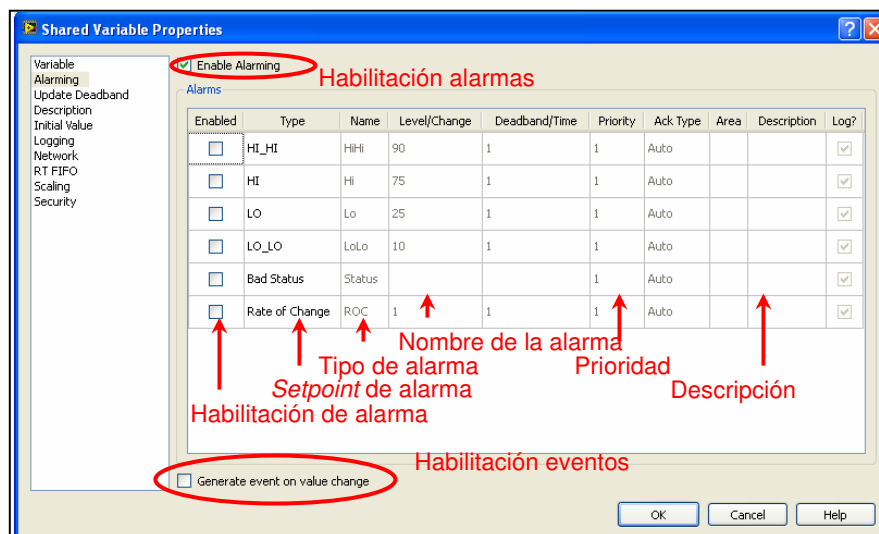
Fuente: elaboración propia.

El código de programación está diseñado para tomar los valores de las variables compartidas, sumar las repeticiones de las mismas, tomando en cuenta como una suma cada vez que la variable cambie de estado ascendentemente, es decir, si la variable cambia de apagado a encendido se activará el conteo, pero no lo hará si la variable cambia de encendido a apagado, esto se logra mediante comparaciones del estado actual con el estado anterior usando compuertas lógicas.

4.3.4.3. Pantalla de alarmas, eventos y reportes

Para empezar con la creación de alarmas y eventos se les debe otorgar estas propiedades a las variables compartidas, para ello en la ventana *Shared Variable Properties* se elige la opción *Alarming*, se habilita el *checkbox Enable Alarming*, en la figura 58 se detalla este ejercicio.

Figura 58. **Habilitación de alarmas y eventos para una variable**



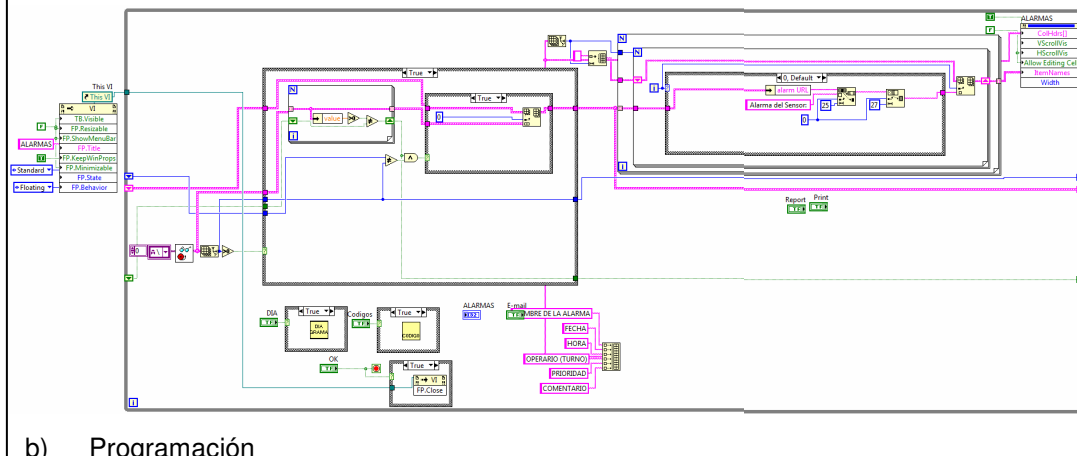
Fuente: elaboración propia.

Al tener seleccionadas las variables que serán monitoreadas y ordenadas específicamente por su comportamiento (alarma o evento), se procede a la creación de pantallas para desplegar esta información. La figura 59 a) muestra la pantalla de usuario donde se visualizan las alarmas.

Figura 59. Pantalla de alarmas

NOMBRE DE LA ALARMA	FECHA	HORA	OPERARIO (TURNO)	PRIORIDAD	COMENTARIO
Alarma del Sensor: Temperatura	Lunes, 03 de Mayo de 2010	08:38:10 a.m.	Juan Perez	1	Falla: Temperatura fuera del limite permitido
Alarma del Sensor: Presion	Jueves, 03 de Junio de 2010	08:36:42 a.m.	Juan Perez	1	Falla: Presion de succion fuera de rango

a) Panel frontal



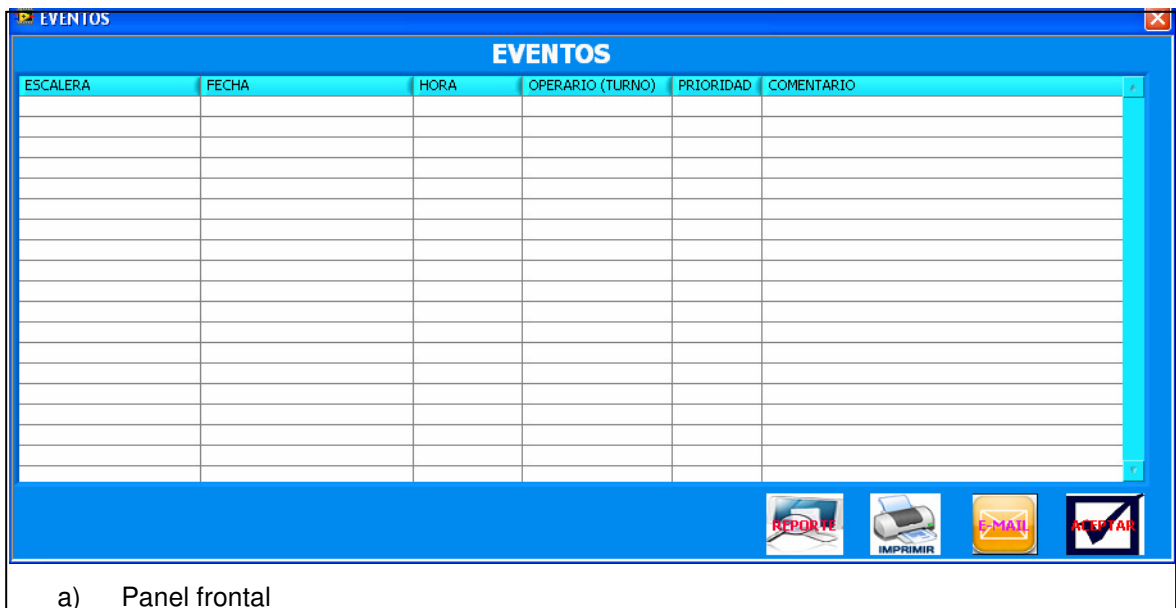
b) Programación

Fuente: elaboración propia.

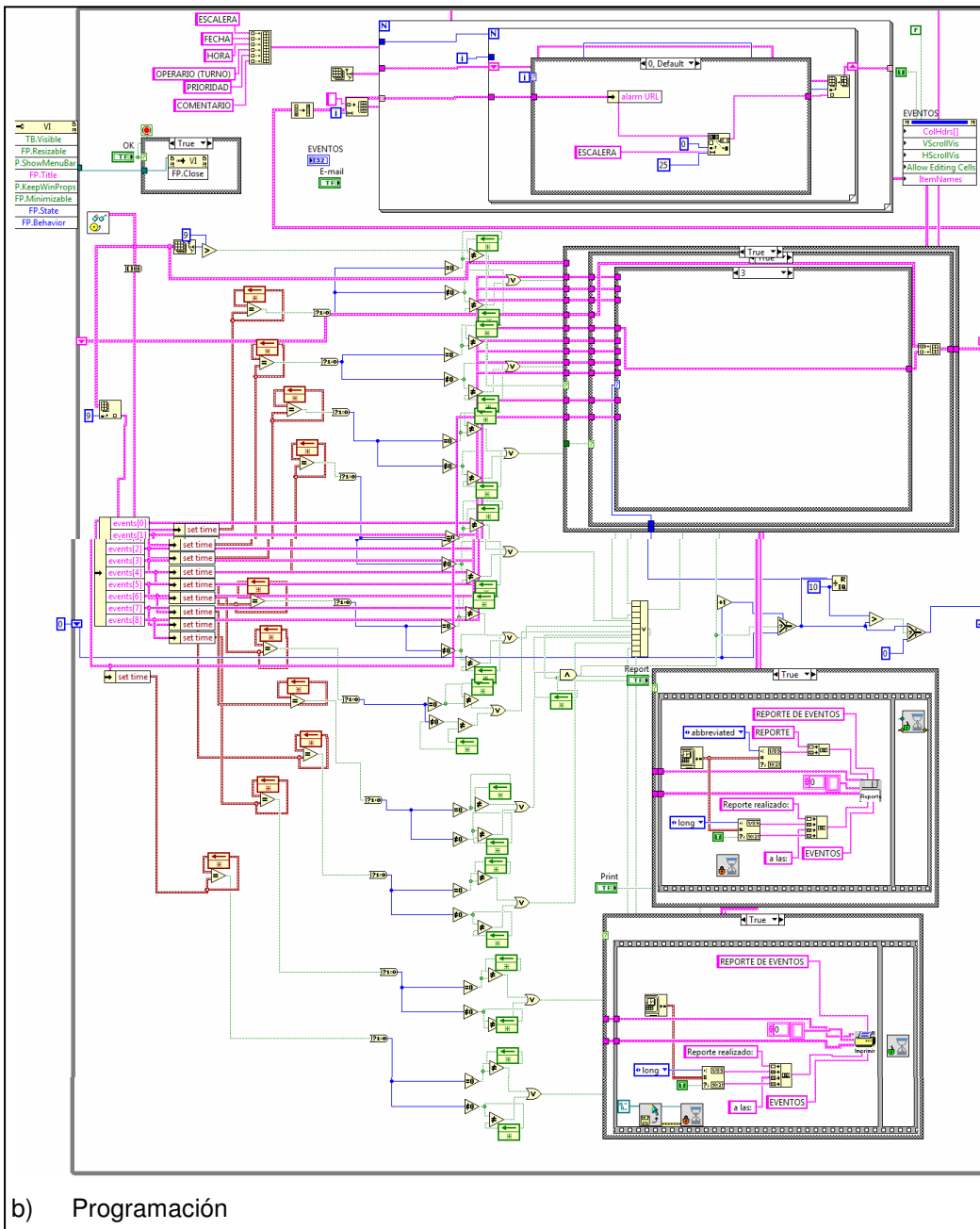
La figura 59 b) muestra el código de programación de la pantalla de alarmas, en el cual el objetivo es obtener los datos provenientes de las variables compartidas a las cuales se les habilitó la alarma para después desglosar la información por medio de ciclos *for* en los cuales se seleccionan los datos que se mostrarán en la pantalla, una vez seleccionados los datos se unen de nuevo utilizando otro ciclo *for* y así tener una sola variable que tenga todos los datos necesarios, al final se invierte la entrada a la pantalla, es decir el último dato o la ultima alarma que entre será la que se despliegue primero.

El código que se encuentra al lado derecho es el utilizado para crear los parámetros necesarios para la elaboración de reportes, es decir nombre del reporte, fecha, hora, , entre otras, más adelante se indicará como es la creación de estos reportes.

Figura 60. **Pantalla de eventos**



Continuación figura 60.



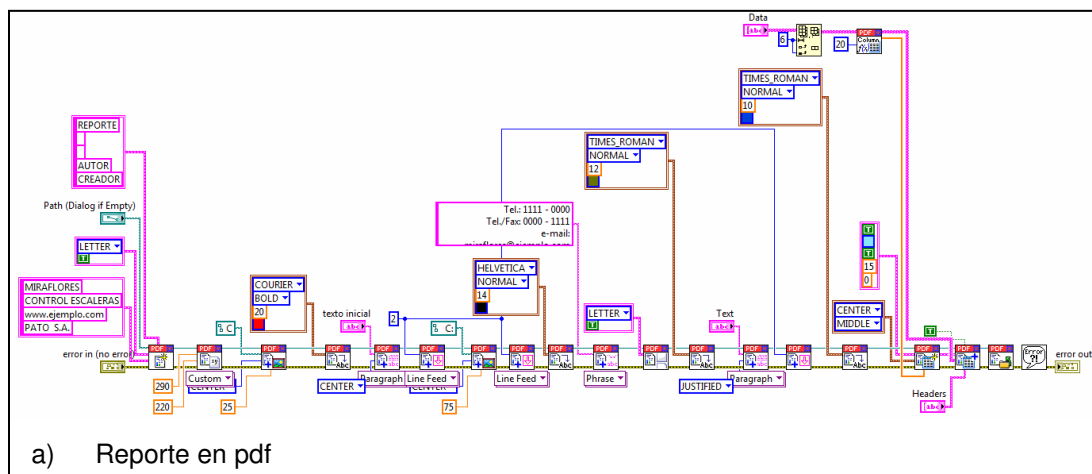
b) Programación

Fuente: elaboración propia.

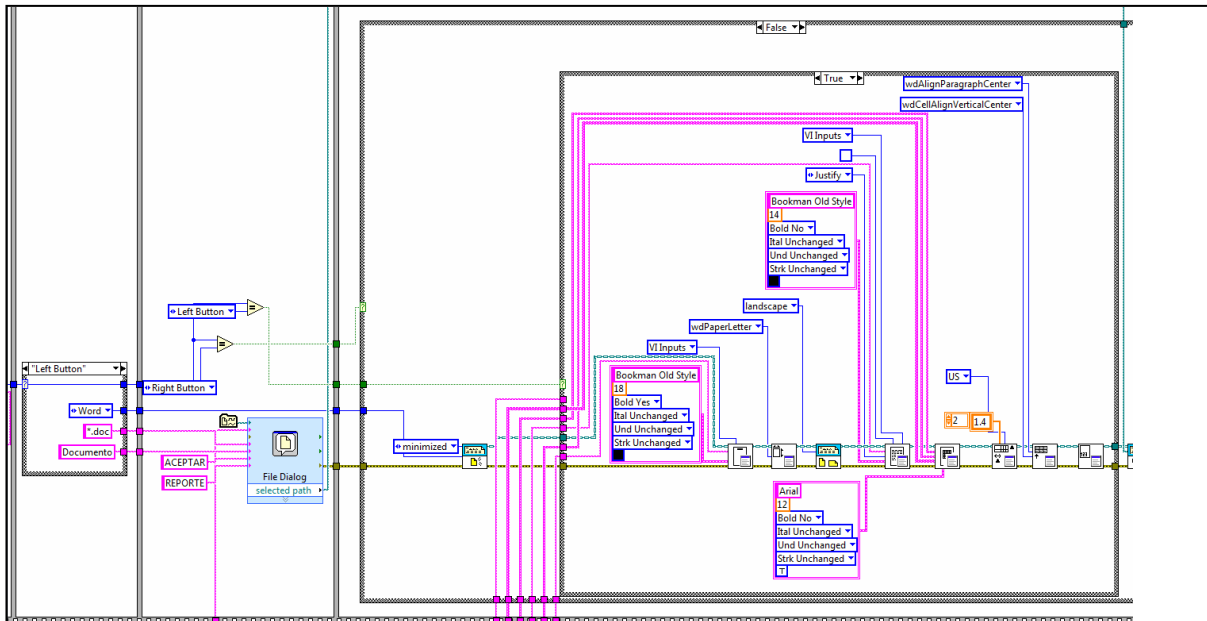
En la figura 60 a) se aprecia la pantalla de eventos que es bastante similar a la de alarmas para que el usuario se acostumbre rápidamente al programa, en la figura 60 b) la programación, la cual se basa en la lectura de eventos a través de variables, pero solo en estado ascendente y procede a ordenar los datos de manera tal que el último evento ocurrido es el primero desplegado, quedando un registro de cuales han sido los eventos ocurridos durante la operación, además de proporcionar toda la información necesaria para la elaboración de reportes.

En estas pantallas está incluida la opción de generación de reportes e impresión de los mismos, esto es apreciable en ambos casos siguiendo el orden de los íconos utilizados.

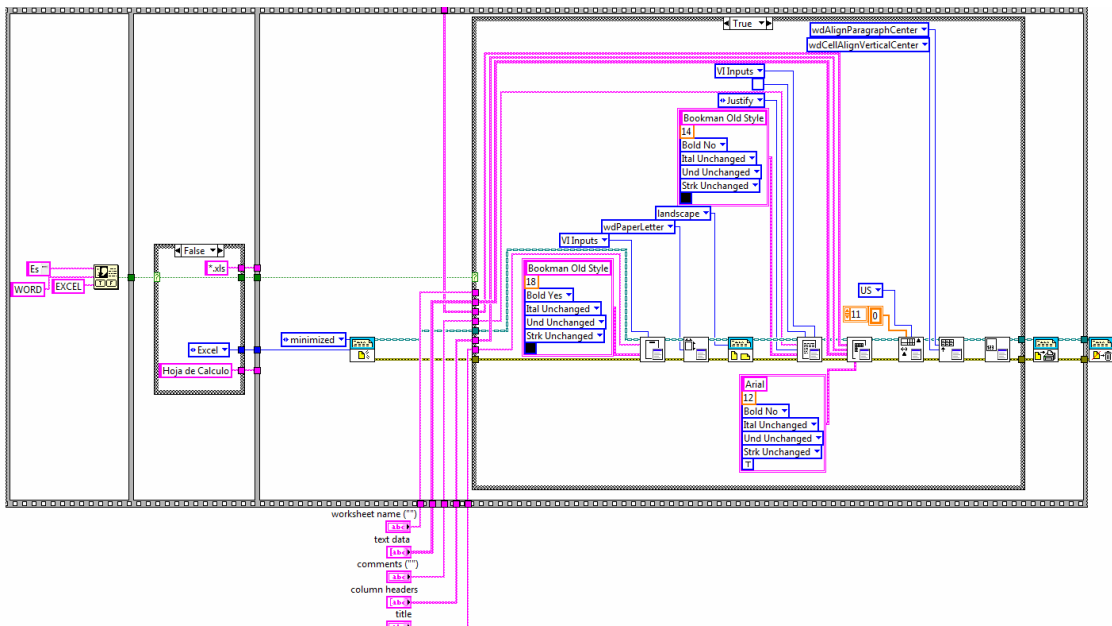
Figura 61. **Código para generar e imprimir reportes**



Continuación figura 61.



b) Reporte en word



c) Impresión

Fuente: elaboración propia.

En la figura 61 a) y b) se muestra la estructura del código de programación para la elaboración de un reporte automáticamente, sin importar cuál sea la extensión (pdf o doc), el proceso es bastante similar para la creación de ambos, siendo la diferencia las herramientas de creación de reporte, es decir en el primero se utilizarán herramientas para pdf y en el segundo para *Word* pero la forma de utilizarlas es prácticamente la misma y la secuencia de programación es igual.

Lo primero es establecer la ubicación del reporte, donde será guardado, esto se puede hacer con una determinada dirección o mediante la apertura de una ventana para que el usuario escoja donde crearlo, en este caso se optó por la segunda. Después de esto es necesario asignarle un nombre al reporte, por conveniencia el nombre del reporte será la fecha de creación seguido del tipo de reporte que es, así por ejemplo: 20 de marzo 2010 Alarmas. Se especifica el tipo de página a usar, por defecto es carta pero se puede cambiar al gusto del usuario, márgenes y tipo de letra.

Al haber configurado el estilo de reporte que se creará se ingresan los datos a escribir, éstos provienen del código de programación de alarmas, eventos e historiadores. Cualquier otra modificación, esto queda a criterio del programador pues no es fundamental en la generación del reporte.

En la figura 61 c) aparece el código para la impresión de un reporte y se puede apreciar que sigue una secuencia similar a la de la creación, en la cual se establece primero dónde está ubicado el reporte, cuáles son las características de página y de especificaciones propias del reporte, para luego incluir los datos a imprimir. La impresora a utilizar será la que esté seleccionada como predeterminada.

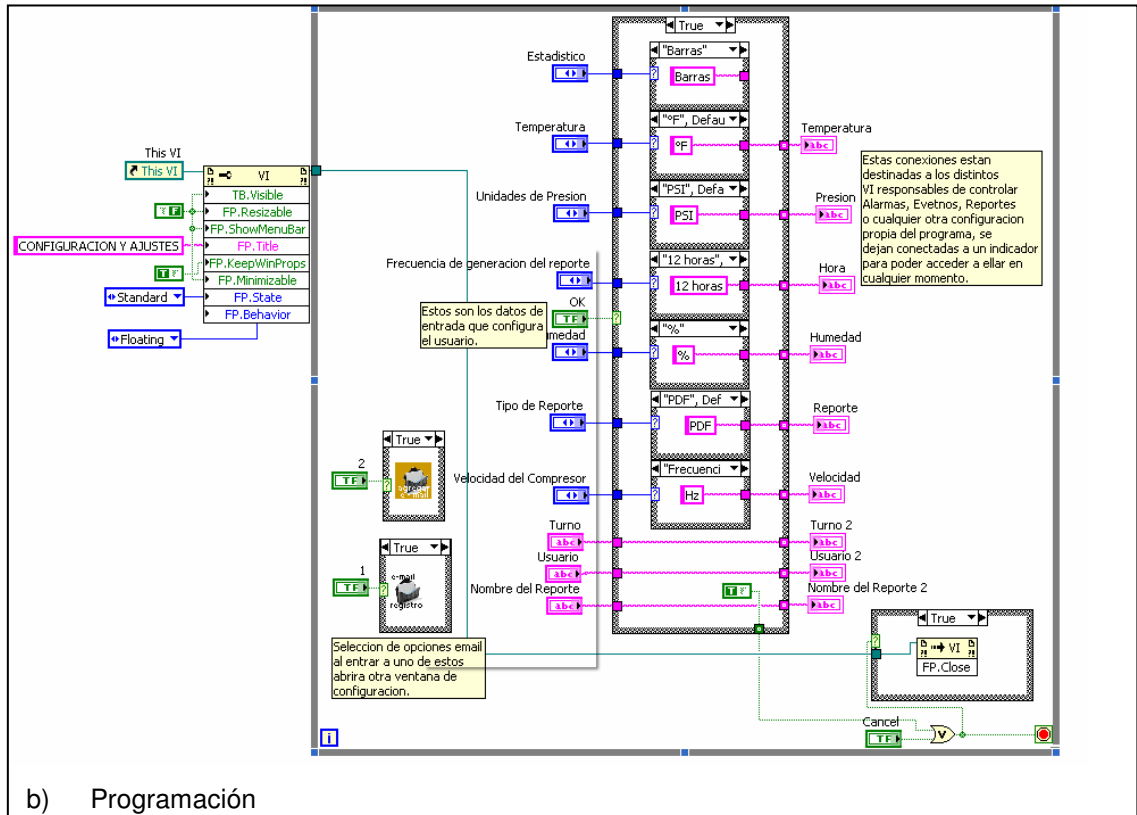
4.3.4.4. Pantalla de configuración

Ésta se refiere a todos aquellos ajustes que el usuario desee hacer, ya sea para cambiar el modo de visualizar las cosas o las unidades con las que está midiendo una variable determinada. En la figura 62 a) se muestra la pantalla de ajustes hecha de manera sencilla y clara para fácil manipulación del usuario.

Figura 62. Pantalla de configuración y ajustes

a) Panel frontal

Continuación figura 62.



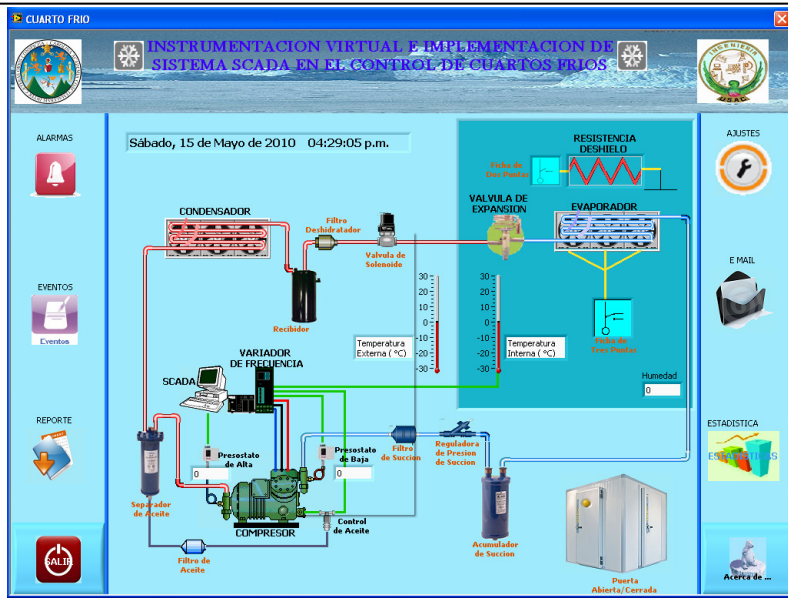
Fuente: elaboración propia.

El código de la pantalla de ajustes es de simple estructura pues sólo se encarga de recoger los datos puestos por el usuario y hacerlos llegar a todos los demás programas a través de variables locales.

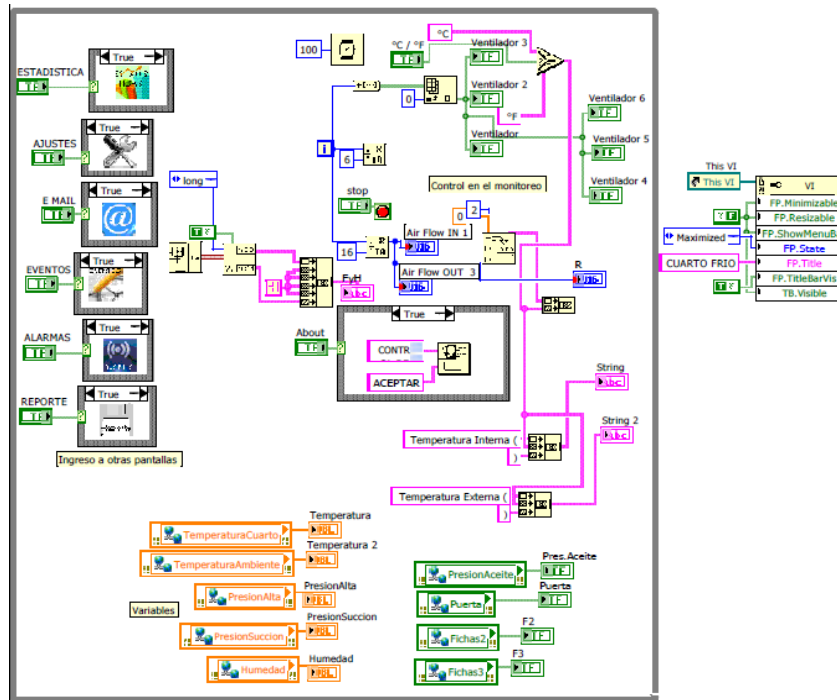
4.3.4.5. Pantalla de supervisión

Es la principal del sistema SCADA, pues por medio de ella se podrá ingresar a todas las demás pantallas, es la que interactuará directamente con el usuario. Está diseñada con un ambiente gráfico animado para que el operador experimente la sensación de estar frente al proceso real, ver figura 63.

Figura 63. Pantalla principal



a) Panel frontal



b) Programación

Fuente: elaboración propia.

La pantalla principal será donde el usuario podrá seleccionar que operación desea realizar, cuenta con un menú gráfico a los lados en donde se tendrá acceso a los diferentes subprogramas que se han descrito hasta el momento, pretende ser lo más gráfica posible para que el usuario se sienta cómodo al trabajar en ella y pueda identificar rápidamente que está sucediendo.

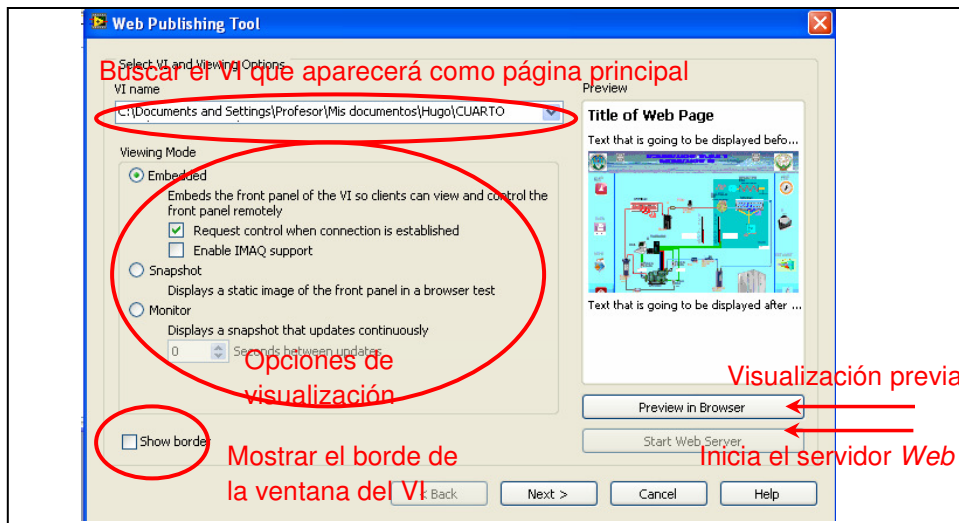
La programación de esta pantalla está dividida en dos partes, la parte izquierda del código es donde se puede ingresar a los distintos subprogramas de los cuales se compone el sistema, esto se logra llamando a los programas a través de ciclos independientes. La segunda parte de la programación es la obtención de datos provenientes de los sensores, esto se hace a través de variables compartidas que fueron ligadas al variador de frecuencia utilizando *OPC Server*, y mostrarlas en la pantalla, con estos datos se procede a realizar animaciones las cuales simularán el funcionamiento del cuarto frío en la pantalla, para que cuando ocurra una anomalía la misma animación le sirva al usuario para detectar algo fuera del funcionamiento normal ha ocurrido.

4.3.4.6. Control remoto

Una de las virtudes del sistema SCADA es poder controlar y supervisar el proceso de manera remota, sin necesidad de estar presente en el lugar donde se encuentra el equipo. Una de las maneras de lograr esta función es utilizar herramientas de *software* que provean la opción de ingresar al programa desde otras estaciones de trabajo.

Para realizar esta acción se levanta un servidor *Web* que haga accesible la inspección y control desde cualquier computadora con acceso a la red. Lo primero es seleccionar en el menú *Tools* la opción *Web Publishing Tool*, en la figura 64 aparece la ventana de configuración del servidor *Web*, en la cual debemos llenar los campos necesarios para subir la información.

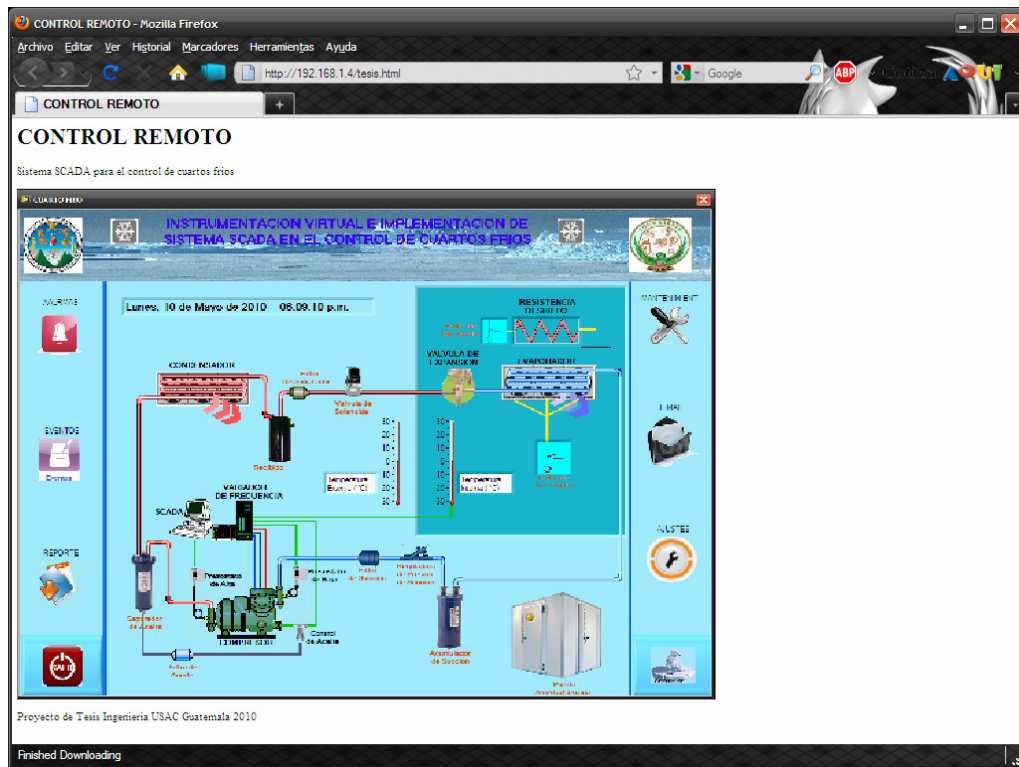
Figura 64. **Ventana de herramientas de publicación *Web***



Fuente: elaboración propia.

Al terminar la configuración, la cual incluye el título de la página, encabezados y pie de página, se debe asignar un nombre para ingresar a ella, en este caso en particular el nombre propuesto para la página fue <http://tesis.html>. En la figura 65 aparece la página *Web* concluida.

Figura 65. Control remoto vía Web



Fuente: elaboración propia.

4.3.5. Alcances del sistema SCADA

El programa queda disponible para hacer cualquier cambio o mejora así como la implementación de otras facultades que puedan llegar a ser útiles, será selección del usuario cuales funciones son de su preferencia y cuáles no. Las actualizaciones de *software* serán una posibilidad con la que continuamente se puede mejorar el programa.

Es de señalar que el control remoto puede expandirse cuanto se quiera, ya sea con más unidades o con otros métodos, por ejemplo el control remoto se logra en una red local pero podría ser expandido a un control vía internet logrando tener accesos a la información del proceso en cualquier parte del mundo, claro que para esto es necesario el poseer una IP privada y depende del servicio de internet contratado por la empresa, pero deja abierta la posibilidad.

4.4. Pantalla táctil

Una pantalla táctil es un aparato que mediante un toque directo sobre su superficie permite la entrada de datos y órdenes al dispositivo. A su vez, actúa como periférico de salida, mostrándonos los resultados introducidos previamente.

La pantalla táctil además de ser utilizada como un elemento para mostrar gráficas, datos y en sí toda clase de información, permite manejar cualquier proceso mediante la programación interna de la pantalla, e interconexión de diferentes equipos para ser subidos a una red, en donde los usuarios puedan acceder a cualquier punto en el sistema.

Los métodos de desarrollo de *software* en una pantalla táctil varían entre fabricantes, pues cada uno de ellos especificará la manera de programar su pantalla, al igual que terceras marcas que pueden ser conectadas al equipo.

4.4.1. Instalación física

Al igual que el variador de frecuencia la pantalla táctil debe instalarse cerca del proceso a controlar, por lo que es primordial garantizar su integridad física y fácil acceso por parte de los usuarios.

Se recomienda instalar la pantalla táctil en el mismo gabinete donde están ubicados todos los demás equipos utilizados, es por ello que la selección de gabinete debe ser tomada con cautela y en base a cálculos de espacio previamente hechos.

Una vez instalada la pantalla táctil el procedimiento de interconexión con el equipo y sistema SCADA se hará mediante *software*, solo es necesario utilizar una conexión RS-485 entre pantalla y variador para lograr compartir los datos del sistema. Por lo tanto el variador servirá de mediador entre la pantalla táctil y el sistema de monitoreo.

4.4.2. Programación *software*

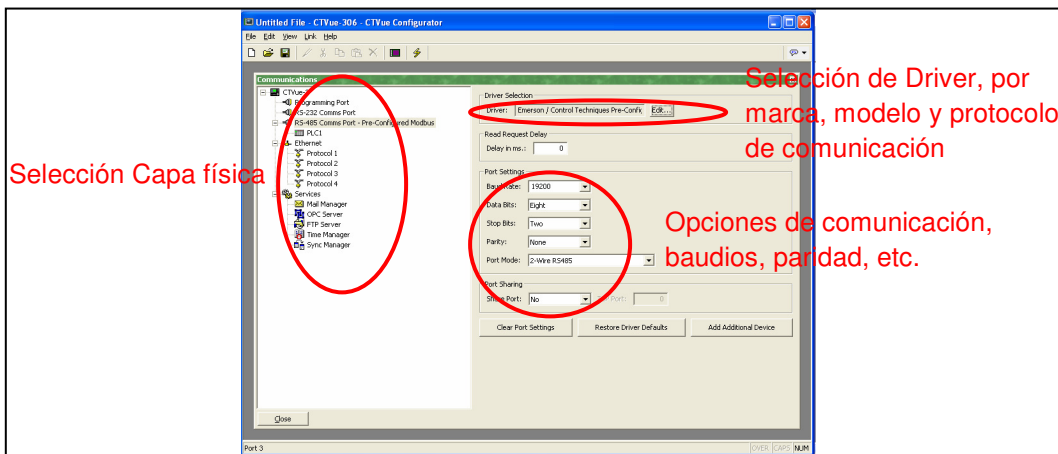
El *software* que a utilizar es *CTVue Configurator*, el cual es compatible con la marca de pantalla táctil con la que se está trabajando. Cada fabricante de pantallas táctiles tiene su *software* de programación, es necesario tomarlo en cuenta al seleccionar la pantalla táctil.

El *software* provee un ambiente gráfico en el cual se pueden agregar imágenes animadas que simulen el comportamiento real del proceso, así como sustituir mandos reales como botones, luces piloto, entre otros, por mandos virtuales que serán manipulados desde la pantalla.

4.4.2.1. Desarrollo de pantallas

El primer paso para el desarrollo de la programación en este *software* es la configuración de la interconexión entre el equipo y la pantalla táctil, seleccionar el menú de *Communications* y en la ventana que aparecerá, figura 66, seleccionar la capa física RS-485, en el *Driver*, seleccionar marca, modelo y tipo de protocolo de comunicación que utiliza el equipo, *Pre-Configured Modbus* para este caso en particular, pues contiene todos los registros del variador que se está utilizando.

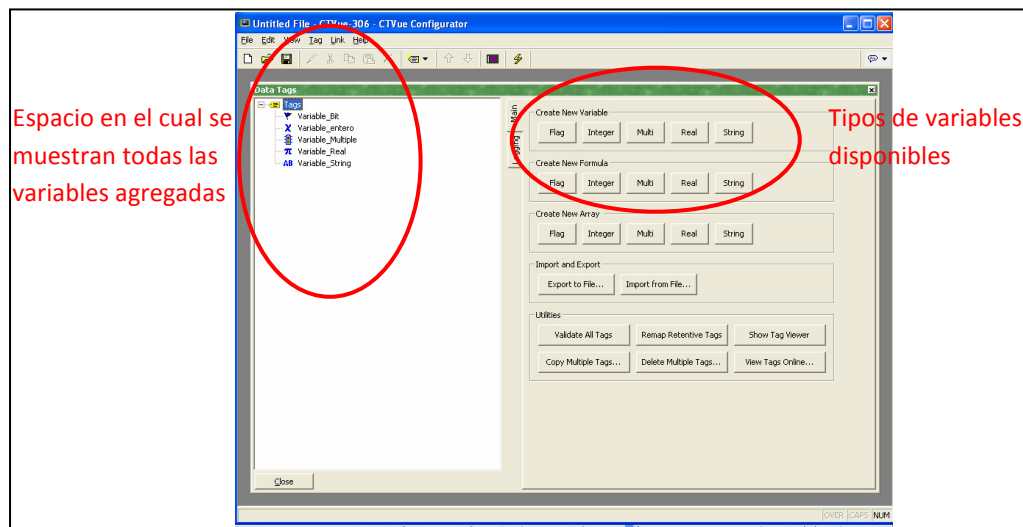
Figura 66. Configuración de comunicación



Fuente: elaboración propia.

Ya establecida la comunicación con el equipo es necesario declarar las variables que se emplearán en transmisión y recepción de datos. Esto se logra seleccionando en el menú principal la opción *Data Tags* la cual abre una ventana, figura 67, en la que se pueden ir agregando los distintos tipos de variables que se utilizarán.

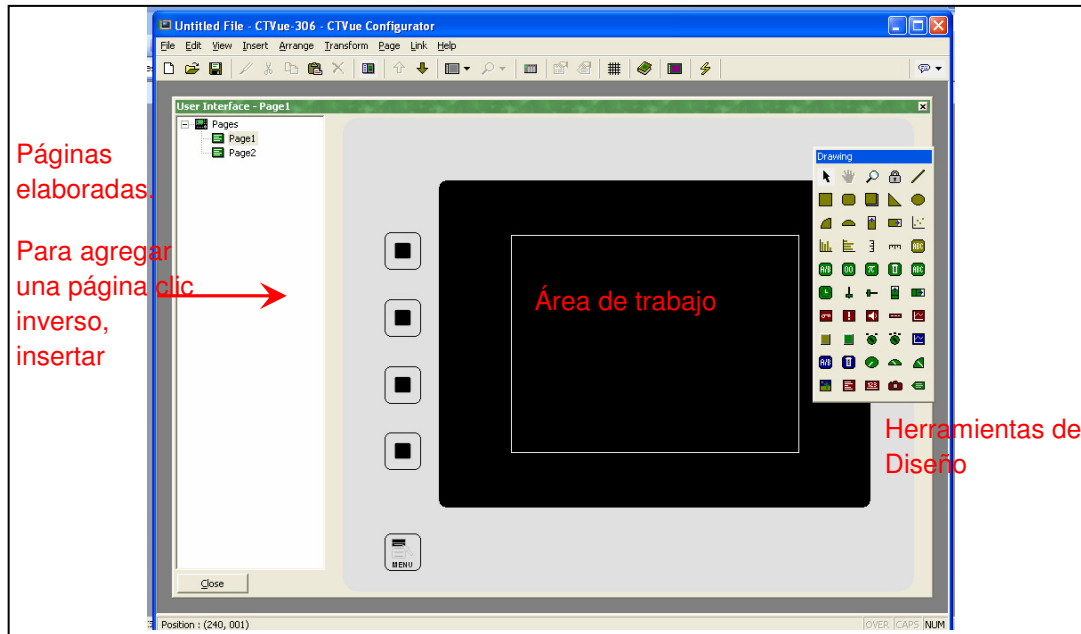
Figura 67. Declaración de variables



Fuente: elaboración propia.

Una vez que se tengan todas las variables necesarias agregadas, se procede a la programación y elaboración de pantallas de visualización. En el menú principal seleccionar *User Interface*, esta opción despliega la ventana en la cual se desarrolla todas las pantallas necesarias por medio de páginas, figura 68. Esta ventana muestra la pantalla táctil como se verá al finalizar la instalación.

Figura 68. Interfaz de usuario para diseño de pantallas



Fuente: elaboración propia.

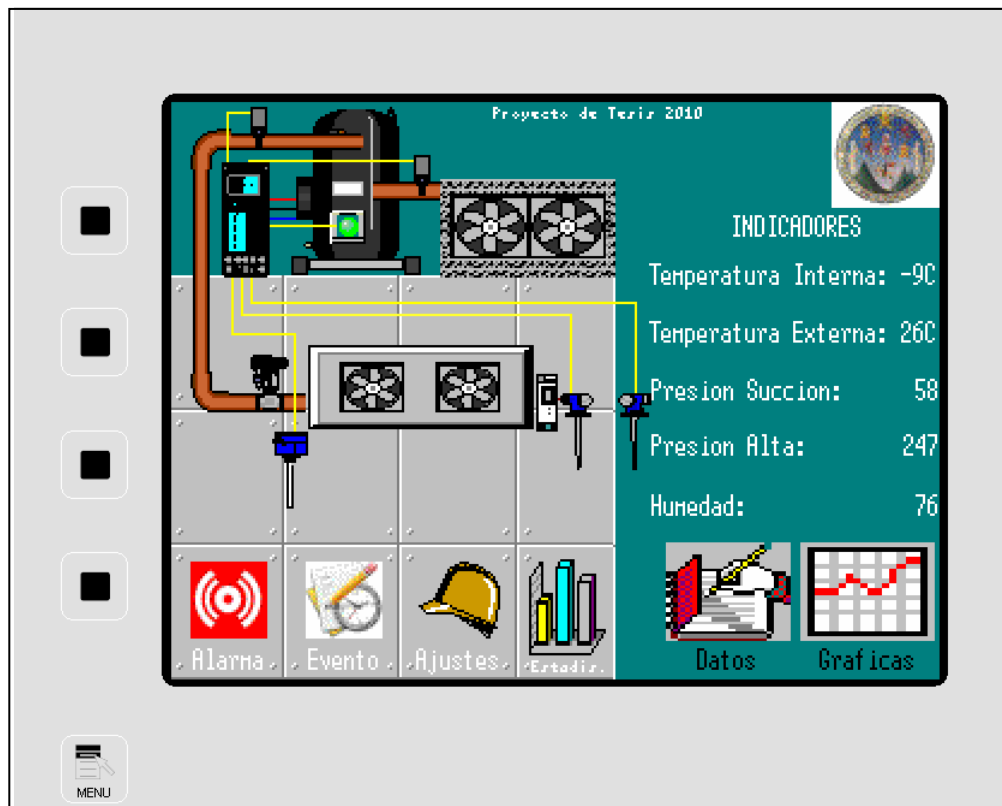
4.4.2.2. Control por pantalla táctil

El control y supervisión local de operación del cuarto frío se lleva a cabo mediante la pantalla táctil, básicamente esta es similar al sistema utilizado en el sistema SCADA de la PC, siendo el objetivo tener la opción de hacer monitoreos y ajustes en cualquiera de las partes del sistema, pero que sea del conocimiento de todos equipos y usuarios que están en línea.

Los usuarios tendrán también notificaciones de alarmas y eventos que ocurran durante el funcionamiento del cuarto frío, ajustes, estadísticas y gráficas del comportamiento del sistema, a través de los íconos en la parte baja de la pantalla.

En la figura 69 aparece la vista final de la pantalla de monitoreo, en la cual se puede tener acceso a todas las demás pantallas sólo con tocar el ícono correspondiente, si se toca el botón de menú se regresa a esta página, pues por defecto es la página inicial.

Figura 69. **Control y supervisión a través de la pantalla táctil**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Convencionalmente los cuartos fríos trabajan por métodos mecánicos de expansión y compresión de refrigerante. La circulación del refrigerante a través de todo el sistema se hace eficientemente con las técnicas actuales de control, pero presenta varias carencias en automatización y regulación de consumo de energía, y aunque los métodos mecánicos con que opera un cuarto frío no pueden ser eliminados, existen recursos para mejorar el funcionamiento de los componentes eléctricos para así optimizar el uso de la energía eléctrica.
2. El primer paso para la solución del problema fue la investigación de la forma en que comúnmente trabaja un cuarto frío para así poder presentar una propuesta técnica y económicamente viable que explique claramente las mejoras del proceso y los alcances de la solución, este paso fue de vital importancia, pues si no se conoce el proceso es muy difícil poder proponer una solución adecuada.
3. Ante los estudios realizados en distintas situaciones y bajo dos tipos de instalación, la convencional y la automatización propuesta, se puede notar que se logra una mejoría considerable en el funcionamiento del cuarto frío. Primero, se logró en promedio un ahorro de energía de 20%, lo cual reduce los costos de operación. Segundo, se ha mejorado el factor de potencia de la instalación de 0,5 a 0,95 lo cual reducirá los pagos de penalizaciones por parte de la empresa eléctrica.

4. El sistema automatizado es más estable y aunque requiere de más equipos y personal especializado, se logran resultados satisfactorios con la calidad del producto y la funcionalidad del sistema.
5. Después del estudio económico se proyecta una recuperación de capital de inversión en un período no mayor a cinco años.
6. El sistema SCADA ha demostrado ser una herramienta que minimiza el requerimiento de operarios para labores cotidianas de inspección del sistema, logrando de esta manera canalizar el recurso humano donde verdaderamente es necesario.
7. La generación de reportes provee a los encargados de mantenimiento y jefes de planta la información exacta de las condiciones en las que ha estado funcionando el proceso, para poder diseñar estrategias de mantenimiento que se adecuen a sus necesidades ahorrando tiempo, dinero y esfuerzos, dejando atrás las tareas de tabulación de datos por parte de personas encargadas al registro de cualquier anomalía o cambio.
8. La notificación de alarmas y eventos hacen del programa una solución para todos aquellos escenarios en los cuales era obligatoria la detención del proceso para su pertinente inspección, lo cual significaba pérdida de utilidades, ahora se puede prevenir e incluso prever estas situaciones.
9. El sistema SCADA proporciona un ambiente gráfico y sencillo en donde el usuario tiene la confianza de manejarse a través de su proceso en la comodidad de una computadora.

10. Aunque varios fabricantes ofrecen sistemas que proporcionan soluciones parciales o totales al problema propuesto, es de señalar que la solución aquí presentada está abierta a la mejora y actualización de los equipos y métodos utilizados, pues no está basada en marcas de equipos y puede ser modificada por cualquier persona calificada, esto hace que el cliente no dependa de la disponibilidad de un equipo único y propietario, o de un técnico especializado en otro país o cualquier otra de las repercusiones que conlleva adquirir sistemas especializados y/o extranjeros.

RECOMENDACIONES

1. El problema aquí presentado tuvo como límite el tamaño del compresor a utilizar, y con base en los resultados obtenidos se plantean resultados igual de satisfactorios en sistemas más grandes, por lo que es conveniente continuar con los estudios en cuartos fríos de mayor capacidad que utilicen compresores de mayor potencia.
2. La estrategia para la reducción de consumo de energía se basó en mejorar el aprovechamiento de la energía utilizada por el compresor, así como minimizar los efectos de los puntos de arranque y paro del mismo, pero se obvió la función de los ventiladores, resultaría altamente beneficioso hacer estudios que determinen cuan significativo es el consumo de energía de los ventiladores y, si lo es, los métodos para reducirlo.
3. Se presenta una solución que involucra un variador de frecuencia como el elemento que efectuará el control y reducirá el consumo energético, ante la variedad de controles electrónicos para motores que existen en el mercado es una buena opción buscar soluciones con combinaciones de otros elementos de control que obtengan iguales o mejores resultados y en donde se reduzca la inversión económica a efectuar, un ejemplo de esto sería utilizar las nuevas generaciones de arrancadores suaves para minimizar el consumo energético en conjunto con bancos de capacitores para mejorar el factor de potencia.

4. Los sistemas de refrigeración presentan gran similitud con los de aire acondicionado y aunque el sistema de aire acondicionado es más complejo y posee mayor cantidad de elementos en su funcionamiento están involucrados motores eléctricos de inducción, debido a esto se exhorta a realizar estudios de ahorro energético a éstos, en donde se pueda demostrar la posibilidad del ahorro y la viabilidad técnico económica del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Air-Conditioning and Refrigeration Institute. *Refrigeración y aire acondicionado*. Estados Unidos: Prentice Hall Internacional, 1981. 873 p. ISBN: 978-968-88-0126-0.
2. *Automatización de instalaciones de refrigeración comerciales* [en línea]. España: Danfoss. 2004 [ref. de 14 junio 2008]. Disponible en Web: <http://www.danfoss.com/Spain/BusinessAreas/Refrigeration+and+Air+Conditioning/EducationAndTraining/Manual+Automatizaci%c3%b3n+de+Instalaciones.htm>. [Consulta: 20 de agosto de 2009].
3. ÇENGEL, Yunus A. *Termodinámica*. 5ª ed. México: McGraw-Hill, 2007. 744 p. ISBN: 978-970-10-5611-0.
4. _____. *Transferencia de calor*. PÉREZ, José Hernán. 2ª ed. México: McGraw-Hill, 2004. 793 p. ISBN: 970-10-4484-3.
5. CHAPMAN, Stephen. *Máquinas eléctricas*. 4ª ed. México: McGraw-Hill, 2005. 746 p. ISBN: 978-970-10-4947-1.
6. *Copeland Refrigeration Manual*. 1970. Estados Unidos: Copeland Corporation, 1970. 63 p. ISSN: 1033-1808.

7. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. 5ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 2003. 760 p. ISBN: 97-884-4813-913-1.
8. *Introducción a los conocimientos básicos de refrigeración* [en línea]. España: Danfoss, 2008 [ref. de 14 junio 2008]. Disponible en Web: <<http://www.danfoss.com/Spain/BusinessAreas/Refrigeration+and+Air+Conditioning/EducationAndTraining/Basic+Refrigeration.htm>>. [Consulta: 20 de agosto de 2009].
9. JIMÉNEZ ANGULO, Verónica Consuelo. *Estudio de factibilidad de un sistema de comunicación integrado al sistema microonda existente, que soporte aplicaciones de sistemas SCADA para el Poliducto Esmeraldas-Quito de Petrocomercial Regional Norte*. Trabajo de Graduación de Ing. Electrónica y Telecomunicaciones. Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2008. 297 p.
10. MARTÍNEZ, Isidro. *Termodinámica básica y aplicada*. España: DOSSAT, 1992. 583 p. ISBN: 84-237-0810-1.
11. MENDIBURU DÍAZ, Henry Antonio. *Ingeniería medioambiental*. Lima: INDECOPI, 2003. 319 p.
12. MORENO, Mauricio. Apuntes de control PID. *Coordinación de Postgrado en Ingeniería de Sistemas de Control* [en línea]. La Paz, Bolivia: Universidad de San Andrés, 2001 [ref. de 30 julio 2002]. Disponible en Web: <http://eureka.ya.com/cpgisc/archivos/controlPID.html>. [Consulta: 4 de septiembre 2009].

13. *Protección de Motores* [en línea]. España: Genius, 2005. [ref. de 25 julio 2009]. Disponible en Web: <http://www.genteca.com.ve/manuales/PROTECCION%20DE%20MOTORES%20V3.pdf>. [Consulta: 27 de agosto de 2009].
14. RODRÍGUEZ, Jorge A. *Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*. Bogotá: Universidad Tecnológica Nacional, 1990. 723 p.
15. ROLDÁN VILORIA, José. *Motores eléctricos, automatismos de control*. 3ª ed. Madrid: Paraninfo, 1994. 238 p. ISBN: 978-842-83-2898-2.
16. ROMERAL, José Luis; BALCELLS, Joseph. *Autómatas programables*. España: Marcombo, 1997. 439 p. ISBN: 978-842-67-1089-5.
17. SANZ FEÍTO, Javier. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Prentice Hall, 2002. 491 p. ISBN: 978-842-05-3391-9.
18. TRAVIS, Jeffrey; KRING, Lisa. *LabVIEW for everyone: Graphical programming made easy and fun*. 3ª ed. Estados Unidos: Prentice Hall, 2006. 1,032 p. ISBN: 978-013-18-5672-1.
19. WARK, Kenneth Jr. *Termodinámica*. 5ª ed. México: McGraw-Hill, 1990. 923 p. ISBN: 968-422-780-9.
20. ZEMANSKY, Mark W. *Calor y termodinámica*. 6ª ed. México: McGraw-Hill, 1985. 668 p. ISBN: 978-840-32-0163-7.