



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

## **AUTOMATIZACIÓN DE CUARTOS FRÍOS PARA AHORRO ENERGÉTICO**

**David Ottoniel Yax Pérez**  
Asesorado por MBA. Ing. Otto Fernando Andrino

Guatemala, mayo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**AUTOMATIZACIÓN DE CUARTOS FRÍOS PARA AHORRO  
ENERGÉTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN  
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR:

**DAVID OTTONIEL YAX PÉREZ**  
ASESOR M.B.A ING. OTTO FERNANDO ANDRINO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MAYO DE 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Veliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Armando Rivera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Veliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **AUTOMATIZACIÓN DE CUARTOS FRÍOS PARA AHORRO ENERGÉTICO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 02 de mayo de 2008.

David Ottoniel Yax Pérez

Guatemala 4 de marzo de 2009

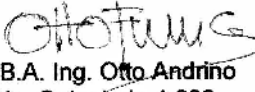
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Ingeniero Escobedo:

Por este medio, me permito informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado AUTOMATIZACION DE CUARTOS FRIOS PARA AHORRO ENERGETICO desarrollado por el estudiante universitario DAVID OTTONIEL YAX PÉREZ, por lo que puedo concluir que dicho trabajo cumple con los preceptos y normas académicas de nuestra casa de estudios.

Por lo tanto, el autor de este trabajo y yo, como asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,

  
M.B.A. Ing. Otto Andino  
No. Colegiado 4,038  
Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 09. 2009.  
Guatemala, 10 de MARZO 2009.

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
AUTOMATIZACIÓN DE CUARTOS FRÍOS PARA AHORRO  
ENERGÉTICO, del estudiante; David Ottoniel Yax Pérez, que  
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

**Ing. Otto Fernando Andriano González**  
Coordinador Area de Electrotécnica



JCSP/sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 12.2009.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; David Ottoniel Yax Pérez, titulado: AUTOMATIZACIÓN DE CUARTOS FRIOS PARA AHORRO ENERGÉTICO, procede a la autorización del mismo.**

**Ing. Mario Renato Escobedo Martínez**  
**DIRECTOR**



**GUATEMALA, 12 DE MARZO 2,009.**

## **AGRADECIMIENTOS A:**

La Facultad de Ingeniería, en especial a la Escuela de Mecánica Eléctrica, por todos los conocimientos adquiridos a lo largo de mi vida universitaria

Mis compañeros y amigos de la "U", por todos los consejos, explicaciones, que en su momento, me salvaron la vida.

Mi asesor M.B.A. Ing. Otto Fernando Andrino, por todos los consejos y ayuda prestados durante mi carrera y en la elaboración de este trabajo.

Todas las personas que de alguna forma contribuyeron a la realización de este trabajo de graduación.



## **ACTO QUE DEDICO A:**

DIOS	El creador del universo y la tierra, que me dio la vida y la fortaleza para finalizar mi carrera.
MIS PADRES	Cecilio Yax Sisimit y Marta Perez de Yax, con todo mi cariño y respeto, gracias por la todos los consejos a lo largo de mi vida.
MI HERMANA	Loida Judith Yax, por ser un gran apoyo y saber escucharme y alentarme.
MI FAMILIA.	Por ayudarme a crecer y estar siempre pendiente de mí.
MIS AMIGOS	Juan, Leonel, Daniel, Edgar, Carlos, Byron, Hector, Selvin, Omar, Dany, Alejandro, por su amistad y apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	IX
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	XIII
<b>GLOSARIO</b>	XV
<b>RESUMEN</b>	XXI
<b>OBJETIVOS</b>	XXV
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XXVII
<b>1. CUARTOS FRÍOS</b>	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Métodos y materiales de construcción	4
1.2.1 Tipos de materiales de aislamiento	4
1.2.1.1. El corcho	8
1.2.1.2. Lana de vidrio	8
1.2.1.3. Madera aislante	9
1.2.1.4. Poliestireno expandible	9
1.2.1.5. Poliuretano	10
1.2.2 Formas de construcción	12
1.3 Equipos de refrigeración	18
1.4 Compresores	22
1.4.1 Funciones de compresor en sistemas de refrigeración	22
1.4.2 Tipos de Compresores y aplicaciones	23
1.4.2.1 Compresor rotativo	24
1.4.2.2 Compresor centrífugo	25
1.4.2.3 Compresor recíprocante	26

1.4.2.3.1 Compresor Tipo Abierto	27
1.4.2.3.2 Compresor Semi-hermético	28
1.4.2.3.3 Compresor Hermético	29
1.5 Evaporadores	31
1.5.1 Tipos de evaporadores y sus aplicaciones	31
1.6 Condensadores	34.
1.6.1 Tipos de condensadores y sus aplicaciones	35
1.6.2.1 Condensadores enfriados por aire	35
1.6.2.2 Condensadores enfriados por agua	38
1.6.2.3 Condensadores evaporativos	40

## **2. AUTOMATIZACIÓN**

2.1. ¿Por qué automatizar?	43
2.2. Costos de automatizaron	44
2.3. Tiempos requeridos para la automatización	45
2.4. Ventajas y desventajas de la automatización	45
2.5. Equipos utilizados en la automatización	46
2.5.1 Autómatas programables	47
2.5.1.1 Bloques esenciales de un autómata	49
2.5.1.2 Comunicación	53
2.6. Software utilizados en la automatización	59
2.6.1 Grafico secuencial de funciones	60
2.6.2 Lista de instrucciones	62
2.6.3 Texto estructurado	63
2.6.4 Diagrama de contactos	64
2.6.5 Diagrama de flujo	66
2.7. Medición de parámetros físicos (sensores)	67
2.7.1 Detectores de proximidad	69

2.7.1.1 Detectores inductivos	69
2.7.1.2 Detectores capacitivos	70
2.7.1.3 Detectores ópticos	71
2.7.1.4 Detectores ultrasónicos	72
2.7.2 Medición de posición o distancia	72
2.7.3 Detectores de Temperatura	73
2.7.3.1 Termostatos	74
2.7.3.2 Termocoplas	77
2.7.3.3 Termoresistencia Pt 100	76
2.7.3.4 Termoresistencia NTC y PTC	76
2.7.4 Medidores de presión	77

### **3. VARIADORES DE FRECUENCIA**

3.1 Definición de un variador de frecuencia	79
3.1.1 Funcionamiento básico	79
3.1.2 Tipos básicos de variadores de frecuencia	80
3.2 Características principales de los variadores de frecuencia	83
3.2.1 Características de alimentación	83
3.2.2 Características nominales de salida del VF	84
3.2.3 Características de control del variador de frecuencia	84
3.2.4 Características Globales del variador de frecuencia.	85
3.2.5 Característicos ambientales	85
3.2.6 Protecciones que lleva un variador de frecuencia	86
3.2.7. Especificaciones de frenado.	86
3.3. Componentes de la parte de potencia de los variadores.	87
3.3.1 Terminología y definiciones de los variadores	87
3.3.2 Semiconductores para convertidores de frecuencia	59
3.3.2.1. El diodo	91
3.3.2.2. Rectificador controlado de silicio SCR	92

3.3.2.3 Tiristor desconectado por compuerta GTO	94
3.3.2.4 Transistor de potencia	95
3.3.2.5 Transistor bipolar de puerta aislada IGBT	97
3.4 Inversores con circuito	97
3.4.1 Clasificación y generalidades	98
3.4.2 Funcionamiento de un Inversor	103
3.5. Inversor con circuito intermedio de tensión	105
3.6 Inversores con circuito intermedio de corriente	107
3.7 Componentes auxiliares de los variadores de frecuencia	108
3.7.1. Transformadores para variadores de frecuencia	108
3.7.2. Bobinas de reactancia	109
3.7.3. Condensadores	110
3.7.4 Protecciones empleadas en los variadores de frecuencia	110
3.7.4.1 Protecciones contra sobretensiones	111
3.8. Motores asíncronos	113
3.8.1. Principio de funcionamiento	113
3.8.2. Componentes de un motor asíncrono	115
3.8.2.1 El estator	115
3.8.2.2 El rotor	116
3.8.2.3 Rotor jaula de ardilla simple	116
3.8.2.4 Rotor de doble jaula	117
3.8.2.5 Rotor bobinado	117
3.8.3. Problemas que surgen en el arranque de motores	118
3.8.4. Convertidores de frecuencia para motores asíncronos	118
3.8.5 Ventajas de la utilización del variador de velocidad en el arranque de motores asíncronos.	120
3.8.6 Frenado de motor asíncrono con variador de frecuencia	120
3.8.7 Modos de funcionamiento de un variador de frecuencia	121

#### **4. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE SISTEMA DE CONTROL.**

4.1 Sistemas de control	123
4.2 Diferencia entre control automático y manual	126
4.3. Variable de proceso	127
4.4. Clasificación de los sistemas de control	128
4.4.1. Sistemas de control de lazo abierto	129
4.4.2 Sistemas de control de lazo cerrado	130
4.4.2.1 Retroalimentación	132
4.4.2.2 Características de retroalimentación	132
4.4.2.3 Actuador final y/o elemento final de control	133
4.4.2.4 Proceso	133
4.4.3 Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con los sistemas de lazo abierto	134
4.5 Descripción del lazo de control	135
4.5.1 Control <i>feedback</i>	135
4.5.2 Control en cascada	136
4.5.3 Control <i>feedforwar</i>	137
4.6 Tipos de acciones de control	138
4.6.1 Acción de dos posiciones	138
4.6.2 Acción temporizada de dos posiciones	139
4.6.3 Acción flotante	139
4.6.4 Acción proporcional (P)	140
4.6.5 Acción proporcional integral (PI)	140
4.6.6 Acción proporcional derivativa (PD)	141
4.7 Control Proporcional integral derivativa (PID)	142
4.8 Elementos que componen el lazo de control en un cuarto frío.	144
4.8.1 Termostato	146
4.8.2 Timer de deshielo	148
4.8.3 Válvulas solenoides	149

4.8.4 Controles de presión	150
4.8.5 Elementos controlados	151
4.8.6 Elementos controladores	152
4.8.7 Diagrama eléctrico de un cuarto frío	153

## **5. AUTOMATIZACIÓN DE CUARTO FRÍO**

5.1 Pasos para la automatización del cuarto frío	155
5.1.1 Conocer el proceso de trabajo de un cuarto frío	155
5.1.2 Modelo propuesto para el control de un cuarto frío	156
5.2 Variable a tomar en cuenta en la automatización del cuarto frío	157
5.3. Sensores a utilizar para la automatización	158
5.4. Diseño de entradas y salidas al PLC	159
5.5. Sintonización del PID	159
5.6. Automatización de cuarto frío	169
5.6.1 Descripción de hardware a utilizar	169
5.6.1.1 Controlador programable Micrologix 1200	169
5.6.1.2 Unidad de entradas y salidas analógicas	171
5.6.1.3. Variador de frecuencia	173
5.6.1.3.1 Programación y parámetros del variador	174
5.6.1.3.2 Modo de programación HIM o led	176
5.6.1.3.3. Parámetros a utilizar para la aplicación	177
5.6.2. Descripción del software a utilizar	180
5.6.2.1 RSlogix 500	180
5.6.2.2 Descripción de funciones a utilizar	181
5.7 Programa del PLC	184
5.7.1 Estructura de memoria	185
5.7.2 Programación del PLC mediante Rslogix	186

5.8 Ahorro estimado de energía por medio de la automatización	190
5.8.1 Cálculo de energía y su costo	192
<b>CONCLUSIONES</b>	199
<b>RECOMENDACIONES</b>	201
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	203





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Paredes para cuartos fríos construcción con ladrillo, piedra u hormigón	13
2	Techos para cuartos fríos contruidos con madera	15
3	Paneles para cuartos fríos prefabricados.	17
4	Diagrama presión-entalpía correspondiente a ciclos simples de refrigeración	18
5	Sistema simple de refrigeración	21
6	Compresores rotatorios	24
7	Compresor centrífugo	25
8	Compresor reciprocante	27
9	Compresor tipo abierto	28
10	Compresor semi-hermético	29
11	Condensador enfriado por aire	38
12	Autómata Programable (PLC)	48
13	Estructura de Autómata	53
14	Topología de redes	55
15	Enlace RS-422 en anillo físico	58
16	Grafico secuencial de funciones	61
17	Elementos básicos de programa AWL	63
18	Elementos básicos de programación con diagramas de contactos	65
19	Elementos básicos de diagrama de funciones	66
20	Estructura genérica de un transductor	68

21	Detector capacitivo	71
22	Sensor óptico	72
23	Termocoplas	75
24	Sensor de presión diferencial	78
25	Diagrama de bloques de variador de frecuencia	79
26	Diferentes configuraciones de variador de frecuencia	80
27	Gráfica de conducción del diodo	91
28	SCR o tiristor	94
29	Onda de corriente para GTO	95
30	Curva de operación de transistor de potencia	96
31	Clasificación de inversores para motores de c.a	100
32	Funcionamiento de inversor de frecuencia	105
33	Conmutador de frecuencia	106
34	Conexiones para transformadores de variadores de frecuencia	109
35	Protecciones utilizadas en variadores de frecuencia	112
36	Espira de alambre cortocircuitada en campo magnético	114
37	Ley de la mano derecha, para dirección campo magnético	115
38	Comparación de las características de funcionamiento que de un variador de frecuencia comparado con un arranque normal	119
39	Curva par-velocidad de motor normal (Izquierda), y curva par-velocidad alimentado con variador de frecuencia (derecha).	119
40	Modos de operación en los cuadrantes de un motor asíncrono para una variador de frecuencia	122
41	Sistema de control.	124
42	Identificación de variables utilizadas en el sistema de control	128
43	Lazo de control cerrado	131
44	Ejemplo de control en cascada.	136
45	Acción proporcional-integral-derivativa (PID)	143
46	Equipo de cuarto refrigerado	145

47	Termostato de bulbo remoto equipado con fuelle	148
48	Timer de deshielo	149
49	Válvula solenoide	150
50	Diagrama eléctrico cuarto frío pequeño	154
51	Curva de respuesta del proceso de $\frac{1}{4}$ de decaimiento	162
52	Curvas de respuesta del proceso típicas.	164
53	Proceso de determinación de la curva de reacción	166
54	Proceso de la curva de reacción	168
55	PLC Micrologix 1200	170
56	Conexión de sensores a modulo de entradas analógicas	172
57	Presentación de los parámetros en pantalla HIM	175
58	Curva torque vs frecuencia	180
59	Programa del PLC	188
60	Modelo propuesto para la automatización	191

## TABLAS

I	Características de distintas termocoplas	76
II	Secuencia de conmutación en ondulator trifásico alimentado con intensidad	105
III	Características del convertidor A/D de los canales de entrada del módulo NIO4I	171
IV	Características del convertidor D/A de los canales de salida del módulo NIO4I	172
V	Parámetros a modificar en variador de frecuencia.	178
VI	Estructura de memoria PLC	185
VII	Direccionamiento de memoria función PID.	186
VIII	Tabla de compresores NTZ, Danffos	194
IX	Costo de energía y potencia para baja tensión con demanda en punta	195
X	Comparación de ahorro de energía y potencia	196
XI	Costos de elementos a utilizar en automatización.	197

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Btu</b>	Unidad de energía inglesa
<b>F°</b>	Grados Fahrenheit
<b>C°</b>	Grados centígrados
<b>cm</b>	Centímetros
<b>ms</b>	Milisegundos
<b>ma</b>	Miliamperios
<b>V</b>	Voltios
<b>mbit</b>	Megabits
<b>mm</b>	Milímetros
<b>DC</b>	Corriente directa
<b>VAC</b>	Voltios corriente alterna
<b>Ohm</b>	Ohmios
<b>Hp</b>	Caballos de fuerza

<b>Mva</b>	Mega volt ampere
<b>Kv</b>	Kilovoltio
<b>Rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>Hz</b>	Hertz
<b>F</b>	Frecuencia

## **GLOSARIO**

<b>AC</b>	Corriente alterna, es aquella que cambia de polaridad con respecto a su neutro. En un semiciclo es positiva y en otro semiciclo es negativa.
<b>Actuadores</b>	Elementos externos al autómata que ejecutan las órdenes dadas por él y que se conectan a las tarjetas de salida.
<b>Autómata programable PLC</b>	Programable logic controller, por sus siglas en inglés). Es un equipo electrónico, programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar en tiempo real y en ambiente de tipo industrial, procesos secuenciales
<b>Bit</b>	Unidad mínima de información en el sistema binario dentro de un ordenador y que puede tomar valores de 0 y 1. 1 Megabyte = 1.000.000 bites.



<b>Bus</b>	Enlace común. Vía a la que varios elementos de un ordenador pueden estar conectados en paralelo de tal forma que puedan pasar señales entre sí.
<b>Bus paralelo</b>	Sistema de transmisión de información que permite transmitir varias señales digitales a la vez, sobre hilos diferentes (por ejemplo, 16 ó 32 bits a la vez en el caso de los BUS de ordenadores). Estos BUS disponen en general de hilos suplementarios que permiten el control de la transmisión
<b>Bus serie</b>	Sistema de transmisión de información en el que estas informaciones, incluidas las de control, se transmiten sucesivamente una tras otra.
<b>Chopper</b>	Rectificadora con diodos y moduladora de unidades analógicas
<b>Compresor</b>	Un compresor es una máquina motora, que trabaja entregándole energía a un fluido compresible. Ésta energía es adquirida por el fluido en forma de energía cinética y presión (energía de flujo).

<b>Conmutación</b>	Alternancia de estado de encendido o apagado en un dispositivo.
<b>Devanado</b>	Componente de un circuito eléctrico formado por un alambre aislado que se enrolla alrededor de un núcleo.
<b>Estator</b>	Parte fija de un motor dentro de la cual gira el rotor o eje,
<b>Instrucciones</b>	Cada una de las órdenes de trabajo de un programa, pudiendo ser de tipo aritmético, lógicas, memorias. E/S (entradas/salidas) y otras.
<b>Impedancia</b>	Oposición que presentan un componente o sistema al paso de corriente alterna.
<b>Par</b>	Es la fuerza desarrollada por un motor durante la rotación.
<b>PWD</b>	Unidad motriz con inverso de modulación de anchura de pulso

<b>Rectificador</b>	Un rectificador es el elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua
<b>Refrigeración</b>	La refrigeración es el proceso de reducción y mantenimiento de la temperatura (a un valor menor a la del medio ambiente) de un objeto o espacio.
<b>Sensores</b>	Elementos externos al autómata por medio de los cuales se transmiten señales a los autómatas y que se conectan a las tarjetas de entrada.
<b>Sensibilidad</b>	Capacidad de un sistema para recibir señales de muy bajo nivel
<b>Sistema</b>	Es la combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen un determinado objetivo.

**Software**

Programa. Término genérico que se aplica a los componentes de un sistema informático que no son tangibles o físicos. Corresponde a los programas escritos por el usuario o por otras personas.

**Trasformador**

Se denomina transformador a una máquina eléctrica que permite aumentar o disminuir el voltaje o tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia



## RESUMEN

En primer lugar, científicamente la refrigeración se interpreta como ausencia de calor, por que en si el frío no existe, lo equipos principales para la refrigeración son:

- Compresor
- Evaporador
- Válvula de expansión.
- Condensador.

El refrigerante es absorbido por el compresor, siendo a continuación comprimido hasta las condiciones de entrada del condensador; en el condensador el refrigerante transfiere calor de condensación a un fluido exterior transformándose al estado líquido.

El refrigerante, en estado líquido saturado, entra en la válvula de expansión. Debido a la irreversibilidad de este proceso una parte de calor latente se pierde entrando el refrigerante al evaporador como una mezcla bifásica de líquido y vapor. Esta mezcla bifásica entra en el evaporador donde hierve a presión y temperatura constante.

En el evaporador el fluido exterior absorbe el calor latente del refrigerante líquido enfriándose a su vez; El enfriamiento del fluido exterior es el efecto útil del ciclo.

El PLC es un equipo electrónico programable diseñado para controlar en tiempo real y en ambiente de tipo industrial procesos secuenciales. Trabaja sobre la base de información recibida por los sensores y programa lógico interno, actuando sobre accionadores de la instalación, haciendo de la automatización una herramienta esencial para la industria.

Las automatizaciones pueden ser tan completas como un SCADA o sencillas con lógica cableada. Y es que con ello se logra control y ejecución de acciones automática sin intervención del operador; agiliza procesos, aumenta eficiencia y costos bajos. Además, se confía en la continuidad de servicio. La estructura básica de un PLC es alimentación eléctrica, CPU, interfaces de entrada e interfaces de salida.

Los variadores de frecuencia tienen características de que puede ser configurado según el requerimiento de la aplicación que se trate y que cuenta con diferentes modos de operación, como arranque a corriente limitada, doble rampa y frenado entre otros.

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular un sistema, con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado. Es decir mantener un proceso dentro de los parámetros establecidos para mantener un control adecuado.

El uso de la automatización como del control, aplicada a un cuarto frío puede significar una oportunidad de ahorro económico muy rentable, ya que de esta manera se podrá controlar la demanda eléctrica de los motores y se reduce la potencia máxima consumida en la instalación.





# OBJETIVOS

## General

Diseñar un sistema de control del proceso de enfriamiento de cuartos fríos por medio de la automatización para conseguir ahorro en energía y demanda.

## Específicos:

1. Describir la forma de operación de un cuarto frío, estableciendo los parámetros a tomar en cuenta en la automatización
2. Conocer la forma de configurar del PLC para comunicarse hacia el variador de velocidad.
3. Analizar las mejores alternativas para la automatización de cuartos fríos.
4. Determinar el ahorro en energía y demanda que se puede obtener con la automatización en un cuarto frío.
5. Conocer los parámetros necesarios para la configuración correcta del Variador de velocidad.



## INTRODUCCIÓN

Guatemala cuenta con una variedad de lugares en donde son utilizados los cuartos fríos, entre los cuales tenemos hoteles, restaurantes, fábricas de alimentos, hospitales, etc. El objetivo principal de este es el almacenamiento en una forma segura de gran cantidad de materia prima con altos índices de seguridad, rentabilidad y calidad.

El éxito de la utilización de cuartos fríos, en general, depende del uso eficiente de el para el almacenamiento de productos, ya que constituyen un equipo destinado a la conservación de los mismos. Los equipos trabajan 24 horas, más de 5 días a semana todo el año, y en la mayoría de casos cuando se paran son para mantenimiento o limpieza.

Uno de los problemas que presentan es el tipo de control eléctrico que poseen, ya que en este control es *on-off*, es decir que opera cuando se le necesita y al llegar a la temperatura deseada se apaga el equipo, y vuelve a empezar el ciclo, esto nos lleva a un gasto de energía considerable, ya que las altas corrientes que se consumen durante el arranque de las maquinas son percibidas por los medidores de demanda y por lo tanto registran esos períodos de arranque como períodos de alta demanda.

Es consecuencia es necesario encontrar un método de reducción del consumo de energía de las maquinas para evitar que estas se eleven demasiado y logran la reducción de la demanda eléctrica de la instalación y por ende reducir el costo de la facturación eléctrica.

Un método para la reducción de consumo de energía es por medio de la automatización se reducen los costos de producción y se mejoran la calidad de los productos, por ello la automatizaron es una de las claves para realizar el ahorro energético en la industria,

En el presente trabajo de graduación se trabaja una automatización de un cuarto frío. Para ello es necesario conocer el funcionamiento del mismo. Se debe profundizar en las características de operación del mismo para poder proponer el modelo adecuado, que conlleve al ahorro energético, el cual es el objetivo principal, proponiendo los controles adecuados para que a la vez sea funcional y que el proceso no sufra cambios por el mismo.

# 1. CUARTOS FRÍOS

## 1.1 Antecedente

Las civilizaciones antiguas utilizaban la refrigeración cuando se disponía de ella en forma natural. Los emperadores romanos hacían que los esclavos transportaran el hielo y la nieve desde las montañas, con el fin de utilizarlos para preservar alimentos y disponer de bebidas frías en la estación cálida, por supuesto que estas fuentes naturales de refrigeración eran extremadamente limitadas, si se piensa en su ubicación, temperaturas y la distancia que se podría transportar, empezamos a desarrollar los medios para producir refrigeración, utilizando maquinaria a estos se les dio el nombre de refrigeración mecánica

Se emplea el término de refrigeración para indicar el mantenimiento de un cuerpo a una temperatura menor que la de sus alrededores, para mantener o producir esta baja temperatura, es necesario transferir calor desde el cuerpo o espacio por enfriar. Un refrigerador es un dispositivo que se emplea para lograr este efecto en base a gastar energía del exterior en forma de trabajo o de calor, o de ambos. Para que el refrigerador opere continuamente, es necesario, además que se extraiga calor al sumidero externo, por lo general, a la atmósfera. De esta manera se puede considerar a los refrigeradores como máquinas de calor que trabajan en sentido inverso; para efectos de comparación con el criterio de Carnot.

La capacidad de enfriamiento de un sistema de refrigeración muchas veces se mide en toneladas de refrigeración. Una tonelada de refrigeración es la capacidad para eliminar calor del cuerpo frío con una rapidez de 200 BTU/min. (840 cal/seg).

Se tiene entonces:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Ton de refrigeración} &= 288,000 \text{ BTU de refrigeración/día} \\ &= 12,000 \text{ BTU de refrigeración/hr.} \\ &= 200 \text{ BTU de refrigeración/min.} \end{aligned}$$

El término “tonelada” se deriva del hecho de que para fundir una tonelada de hielo a 32° F (0° C) en 21 hrs., se necesita aproximadamente 288,000 BTU (75,576, 000 cal).

En unidades del sistema internacional, SI

$$\begin{aligned} 1 \text{ Ton de refrigeración} &= 211 \text{ kJ/min.} \\ \text{Ton} &= 3516 \text{ Kw.} \end{aligned}$$

Es conveniente clasificar las aplicaciones de la refrigeración en las siguientes categorías: doméstica, comercial, industrial y aire acondicionado. A veces se considera a la refrigeración aplicada al transporte como una categoría aparte; la refrigeración doméstica se utiliza en la preparación y conservación de alimentos, fabricación de hielo, y para enfriar bebidas en el hogar. La refrigeración comercial se utiliza en las tiendas de venta al menudeo, restaurantes e instituciones, con los mismos fines que en el hogar. La refrigeración industrial es necesaria en la industria alimenticia para el procesamiento, preparación y preservación a gran escala.

Aquí se incluye su utilización en plantas de enfriamiento y congelamiento de los alimentos, cervecerías y lecherías para citar solo unas cuantas aplicaciones. Cientos de otras industrias utilizan la refrigeración, entre ellas se encuentran las plantas para la fabricación de hielo, refinerías de petróleo y plantas de la industria farmacéutica.

La refrigeración también se utiliza extensamente, tanto en el aire acondicionado para el confort de las personas, como en el aire acondicionado para su utilización industrial.

Para el desarrollo de la disciplina frigorífica propiamente dicha, y antes de entrar de lleno a los cuartos fríos cabe aclarar que en vez de usar las expresiones de “refrigeración comercial” y de “refrigeración industrial”, se hará más bien una primera y fundamental clasificación, como reflexión en el más amplio sentido de la palabra. Esta se presenta de la siguiente manera:

1. Refrigeración para conservación o cuartos fríos de alta temperatura. Se escogen, en esta denominaron, todas aquellas instalaciones que en mayor o menor medida se adapten a las actividades siguientes:
  - Cámaras de conservación para productos alimenticios, en mercados y comercios al público
  - Vitrinas de exposición para grandes almacenes al público, como también en pequeños y medianos comercios.



- Armarios para bares cafeterías, almacenamientos de bebidas en general, también furgones de reparto.
- Bancos de sangre y de productos clínicos, así como también de cadáveres, etc.

## 2. Refrigeración para congelación o de baja temperatura

- Frigoríficos mayoristas de distribución y camiones de transporte desde las grandes producciones
- Recepciones y almacenamiento de pescados en general
- Mataderos de reses en general y almacenaje de grandes cuartos
- Fabricaron de hielo en barras, pistas de patinaje

### **1.1. Métodos y materiales para la fabricación de cuartos fríos**

#### **1.2.1 Materiales utilizados en el aislamiento**

El aislamiento es el método más eficaz de reducir la transmisión de calor. Existen varios productos que se acomodan a los requerimientos de cada aplicación, aunque unos son mejores que otros. Las clasificaciones generales de las formas disponibles de aislamiento son:

1. Material flojo
2. Flexible
3. Rígido o semirrígido
4. Reflectivo
5. En forma de espuma

El aislamiento con material flojo se usa principalmente en estructuras residenciales. Los aislamientos flexibles, tales como papel kraf, que actúa como barrera de vapor. En algunas aplicaciones, se encuentra disponible también con un material reflectivo para reducir los efectos del calor radiante. Los aislamientos rígidos y semirrígidos son hechos de materiales, como laminas de corcho, polietileno espuma de vidrio, poliuretano, los cuales son fabricados en varias dimensiones y formas, como placas, láminas o bloques. Algunas tienen cierto grado de fuerza estructural, otras no, en esta categoría, se encuentran laminas amplia aplicación a la refrigeración: enfriadores congeladores, vitrinas, etc. A causa de su densidad y humedad. El aislamiento tipo espuma se usa junto con los aislantes rígidos en la construcción de cuartos refrigerados.

El control de la humedad en el aislante es muy importante, ya que el agua es un buen conductor de calor, alrededor de 15 veces más que la fibra de vidrio. Así, si hay agua en el aislamiento, su resistencia estará grandemente reducida, sin mencionar el problema físico que causa en la construcción. Por lo tanto, el aislamiento debe estar seco cuando se instala y debe sellarse perfectamente, para que permanezca seco. Los sellos de vapor pueden hacerse de varios materiales: carcasa de metal, lamina de metal, película plástica, recubrimiento con asfalto, etc. Algunos son mas eficaces que otros y la selección depende de la aplicación.

La habilidad de un material para resistir la trasmisión de de vapor de agua se mide en permes, que es un termino relativo a la permeabilidad.

Para la aplicación de refrigeración de baja temperatura, tales como congeladores, se necesita materiales con 0.0 permes o menos.

La eficiencia del aislamiento y la barrera de vapor ser reduce gradualmente si existen aperturas, no importa cuan pequeñas sean. Tales aperturas puedes ser causada por trabajo deficiente durante la construcción o por un mal sellado alrededor de aperturas para líneas de refrigeración, líneas de drenaje, alambrado eléctrico, etc., todos los cuales son parte de la responsabilidad del técnico que lo instala. La elección de una aislante térmico cualquiera, se relaciona siempre, por normal general, con una de las tres razones siguientes:

1. Economía en los consumos de combustible.
2. Exigencias técnicas de mantener una determinada temperatura o de hacer llegar un afluida (vapor, agua caliente, etc.) con la mínima perdida de calorías, apunto a menudo muy alejados de la fuente de calor.
3. Necesidad de obtener una conveniente protección contar reverberaciones caloríficas excesivas, con relación al ambiente, entre distintas partes de una instalación, refiriéndose esto al reflejo de calor entre una superficie luminosa y otra pulida

El prevalecer de uno o de otro punto determinara las características funcionales del revestimiento aislante, cuyo tipo y espesor quedan luego establecidos por el cálculo, de acuerdo con los factores específicos que puedan presentarse al efecto, entre ellos:

- Valor de las temperaturas que se va considerar
- Recuperación de calor o perdida de temperatura admitida
- ubicaron en recinto cerrado o a la intemperie
- Disposición, forma, destino y dimensiones de los equipos e instalaciones, etc.

Aun cuando resulte prácticamente imposible alcanzar la eficiencia ideal, esto es, el 100 %, existiendo un limite de saturación mas alta del cual de nada servirá aumentar los espesores( pues la misma masa aislante logra siempre transmitir una parte aunque mínima, del calor latente que va paulatinamente acumulándose en su interior); dicho limite será, sin embargo, técnica y económicamente tanto mas alto, cuando menor resulte el coeficiente de conductividad calorífica, y le calor especifico propio del material aislante que se adopte..

Lo que verdaderamente aísla es el aire encerrado, impedido de circular, es decir que ha de considerarse mejor y más eficaz, el que mas impida la circulación del aire; entre los materiales aislantes más comunes se encuentra:

#### **1.2.1.1. El corcho**

El corcho natural es la corteza del alcornoque, que crecen en los países del mediterráneo. La corteza es una sustancia orgánica consistente en un gran número de pequeñas células, cuyas finas paredes son de madera. Las paredes separan las células y estas están rellenas de aire.

El corcho natural puede mejorarse considerablemente calentándolo en una cadera cerrada, algunas veces con la adición de asfalto. A temperaturas altas, el corcho ablanda, y la caldera se pone entonces bajo vacío, para que el aire de las células se expanda e infle el corcho. Aun bajo vacío, se deja enfriar y la pequeña cantidad de resina del corcho, ayudada por algún asfalto mantendrá el corcho en un estado expansionado. El producto de este proceso es el corcho expandido, y sus propiedades son mejores que las del corcho natural.

#### **1.2.1.2. Lana de vidrio**

Consistentes fibras de vidrio muy finas, tiene muy buena capacidad como aislante, no absorbe agua, pero es aconsejable protegerlo contra esta.

### **1.2.1.3. Madera aislante**

Consiste en fibras de madera seleccionadas por sus mayores propiedades aislantes tratadas químicamente e impermeabilizadas. Gracias a este procedimiento librador especial, estas fibras son transformadas en grandes y resistentes hojas o tablas de peso liviano, dotadas de altas propiedades aisladoras contra el calor, frío y ruidos.

### **1.2.1.4 Poliestireno expandible**

Conocido comercial como "*Styripor*" que es la perla o materia prima antes de ser procesada, y por "Duropor" las láminas o material ya listo para su utilización; este es un derivado del petróleo, que se presenta en forma de moléculas o perlas que tienen en su interior un gas interno, generalmente pentano, el cual por medio de un tratamiento de vapor a una temperatura de 212°F (100°C) aproximadamente, ocurre una reacción que tiende a desalojar el gas produciendo una expansión de una molécula, el poliestireno es preparado por polimerización.

Tiene la gran ventaja de que pueda ser modelado, y es excelente aislamiento térmico y eléctrico, de baja densidad, excelente estabilidad dimensional y baja absorción de humedad. Tiende mucho a la rajadura y al agrietamiento.

### **1.2.1.5. Poliuretano**

El poliuretano, por sus múltiples posibilidades de producción y sus excelentes propiedades, lo han convertido en el material preferido para el aislamiento en refrigeradores, congeladores, cuartos refrigerados, hieleras, termos, paneles para construcción, etc.

Los uretanos, aunque constituyen tan solo una pequeña parte de la gran familia de los plásticos, son sin lugar a duda el grupo de polímeros mas espectacular y revolucionario hasta hoy conocido, pues reúnen las mayores posibilidades de variación y difícilmente plástico alguno pudiera comparársele.

Los isocianatos, de donde básicamente se derivan los uretanos, fueron descubiertos en Alemania a finales del siglo pasado. Uretano es el nombre común con que se conoce el etil carbonato. Cuando las moléculas poliméricas se unen si a través de puentes de uretano, al polímero resultante se le da el nombre poliuretano.

Para la formación de las espumas de poliuretano, se aprovecha el calor generado en la reacción exotérmica entre el poliol y el disocianato para volatilizar un agente de soplado de bajo punto de ebullición previamente mezclado, y así proporcionar el efecto espumante. La formación de celdas dentro del polímero implica el uso de agente espumante.

La formación de celdas dentro del polímero implica el uso de agentes tensioactivos que determinan el tamaño y fórmula de las mismas, y al mismo tiempo las estabilizan.

El proceso de fabricación del poliuretano es en principio sumamente sencillo. Para producir espumas de poliuretano utilizada en el campo de la refrigeración, se utiliza un sistema de poliuretano de dos componentes.

Los componentes se denominan generalmente como "A" y "B". el componente "A" estará compuesto por una mezcla de polioles, agente de espumado, los catalizadores metálico y aminito, un agente tenso activo, pigmentos y algunos aditivos, según sea el caso. El componente "B" estará constituido, en su mayor parte, por diisocianatos mezclados ocasionalmente con otros productos.

Muchos materiales avilantes no son convenientes para cuartos refrigerados, pues absorben humedad den mayor o menor grado, pero a pesar de este hecho se usan frecuentemente e incluso con excelentes resultados, si se proporciona protección adecuado contra la humedad, evitando que dicha humedad del aire circulante penetre en el aislamiento y se condense dentro de el.



### **1.2.2. Formas de construcción**

Un cuarto frío se puede construir de diversas formas y materiales. Existen cuartos que llevan trabajo de albañilería y cuartos pre-fabricados han tomado un auge importante, debido al corto tiempo de fabricación y montaje y a la eficiencia de los mismos

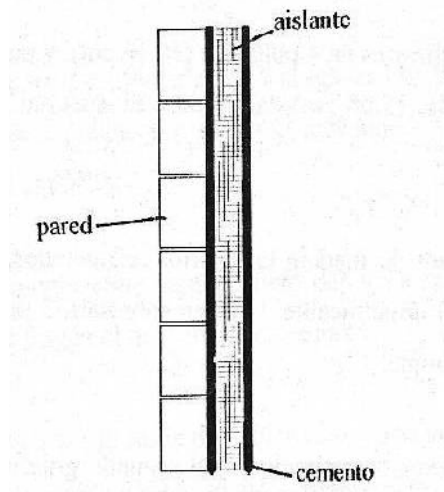
Las formas de fabricar un cuarto frío de obra de albañilería es diversa y se presentan algunas a continuación:

#### **1. Paredes de ladrillo, piedra u hormigón**

El aislante que se va a utilizar es de 4 pulgadas (10.16 cm.), y puede ser de un grueso o de dos gruesos de 2 pulgadas (5.08 cm.) cada uno. El material adherente puede ser Cemento Pórtland o asfalto.

Cuando se utilizan 2 gruesos de asilamiento, el segundo grueso de asilamiento se debe fijar primero con clavos de hierro galvanizado o clavijas de madera

**Figura 1. Paredes para cuartos fríos construcción con ladrillo, piedra u hormigón**



## 2. Paredes de madera

El aislante que se va a utilizar es de 4 pulgadas (10.16 cm.), y puede ser de un grueso o de 2 gruesos de 2 pulgadas (5.08 cm.) cada uno. El material adherente puede ser cemento Portland o asfalto.

Cuando se utilizan paredes de madera en cuartos refrigerados, se debe recubrir el tabique de madera con papel impermeable, y debe sobresalir 3 pulgadas (7.62 cm.) en todas las dimensiones del tabique.

Cuando se utilizan dos gruesos de aislamiento, el segundo grueso de aislante se debe fijar primero con clavos de hierro galvanizado o clavijas de madera.

### 3. Techos de hormigón

El aislante que se va a utilizar es de 4 pulgadas (10.16 cm.), y puede ser de un grueso o de 2 gruesos de 2 pulgadas (5.08 cm.) cada uno. El material adherente puede ser cemento Portland o asfalto.

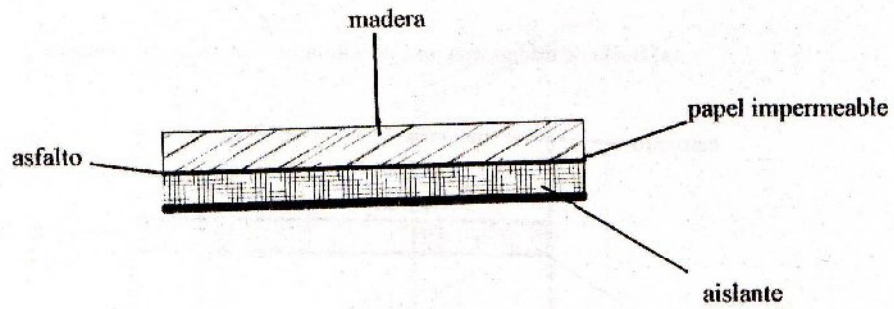
Al utilizar cemento entre la superficie del techo y el aislante, se debe sujetar el aislante hasta que fragüe el mortero de cemento.

### 4. Techos de madera

El aislante que se va utilizar es de 4 pulgadas (10.16 cm.), y puede ser de un grueso o de 2 gruesos de 2 pulgadas (5.08 cm.) cada uno. El material es asfalto.

Al utilizar techos de madera en cuartos fríos, se debe recubrir el tabique de madera con papel impermeable, y debe sobresalir 3 pulgadas (7.62 cm.) en todas las dimensiones del tabique.

**Figura 2. Techos para cuartos fríos construidos con madera**



(a) Material adherente: asfalto  
Aislante: 1 grueso

## 5. Pisos de madera y hormigón

El aislante que se va a utilizar es de 4 pulgadas (10.16 cm.), y puede ser de un grueso o de 2 gruesos de 2 pulgadas (5.08 cm.) cada uno.

Para el refuerzo del piso, se puede utilizar un entarimado con travesaños de 4 x 1 pulgadas (10.16 x 2.54 cm.), a una distancia de 37 pulgadas (93.98 cm.) entre centros; Los acabados el piso pueden ser de pavimento Cemento Pórtland

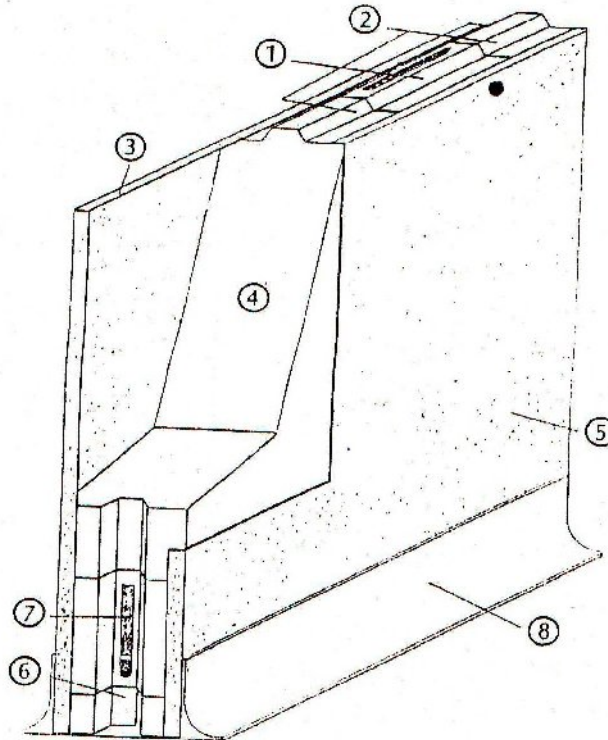
Como se mencionó anteriormente, los cuartos refrigerados pre-fabricados son preferidos a los cuartos refrigerados con obra de albañilería; Por el corto tiempo de fabricación e instalación; además por, la eficiencia en el aislamiento, que significa menos transferencia de calos a través del cuarto, por lo tanto es menor el consumo de energía.

Los cuartos fríos prefabricados mas comunes son los aislados con poliestireno expandido o poliuretano; el poliuretano es el más eficiente en cuando a la transferencia de calor.

Los cuartos fríos prefabricados se construyen generalmente en paneles, cada panel esta formado generalmente por las siguientes partes:

1. Seguro "macho"
2. Montaje "macho"
3. Lamina metálico (aluminio corrugado color natural o blanco, acero galvanizado corrugado o liso, acero inoxidable, galvalume).
4. Aislamiento
5. Lamina metálica
6. Montaje "hembra"
7. Seguro "hembra"
8. Nivelador de vinyl

**Figura 3. Paneles para cuartos fríos prefabricados.**



Fuente: Mr. Winter, (catálogo), Mr. Winter Inc., Estados Unidos

Es común encontrar aplicaciones donde es necesario aislar el piso del cuarto frío. El interior de los paneles que forman el piso está hecho con acero galvanizado de calibre 16 ó 14 y depende del tráfico a que estará expuesto el cuarto.

Adicionalmente el piso se puede reforzar con madera o puede ser de acero inoxidable en los casos con mayor riesgo de corrosión. También es posible fabricar rampas interiores o exteriores que faciliten el acceso de vehículos al cuarto, incluso en casos de extremo tráfico.

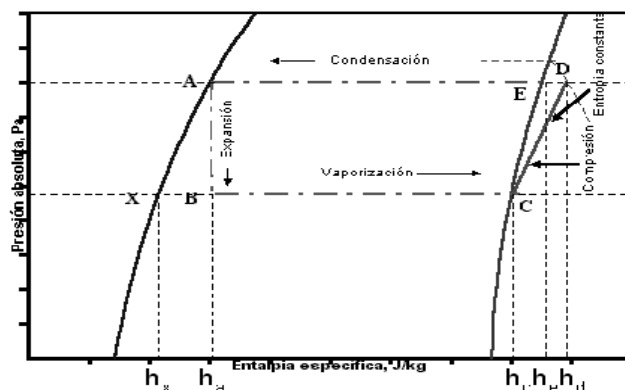
Se utilizan lámina de acero repujado de 1/8 de pulgada (0.32 cm.) que añade gran resistencia al piso aislado.

Otra forma de asilamiento, para los pisos de cuartos fríos, es fabricando un capa de material aislante cubierto por concreto para formar la base del cuarto. Este tipo de piso es utilizado comúnmente en cuartos de procesos y producto terminado, y ofrecen una mejor resistencia al desgaste por tráfico, pero no pueden ser trasladados de un lugar a otro.

### 1.3. Equipos de Refrigeración

Antes de conocer de forma individual los diferentes equipos que componen el sistema de refrigeración, es importante conocer el funcionamiento global del sistema, y la mejor forma de comprender este funcionamiento se puede observar con la grafica de presión-entalpía.

Figura 4. Diagrama presión-entalpía correspondiente a ciclos simples de refrigeración



Fuente: SEVERS, W.H y otros, **Energía mediante vapor aire o gas.** (México; Editorial Reverte), p. 465.

En la gráfica, se observa que en el proceso real, el refrigerante líquido llega a la entrada de la válvula de expansión en estado saturado o sobre enfriado. Como se quiera o no es factible la expansión isoestropica, la misión de la válvula de expansión consiste en estrangular el paso del refrigerante (variando la cantidad por medio de un orificio de diámetro variable), para producir un estado de entalpía constante.

El proceso de estrangulación con entalpía constante produce un aumento de entropía en el refrigerante, a medida que disminuye su presión y temperatura para satisfacer las condiciones exigidas en el evaporador.

El funcionamiento real, la temperatura del refrigerante que hierve en el evaporador debe ser inferior a la del medio que se trata de enfriar. La presión mantenida en el evaporador viene fijada por la temperatura del refrigerante, esta viene fijada por la temperatura del refrigerante necesario para conseguir el enfriamiento deseado. En un ciclo real, el vapor del refrigerante puede abandonar el evaporador en los siguientes estados: saturado húmedo, saturado seco y recalentado. Generalmente conviene cierto calentamiento; en un ciclo real, la compresión polotropica y el estado final de refrigeración comprimido dependen en parte de su estado inicial. El medio calentado tal como se descarga, entra en el condensador en donde el medio que lo enfría se mantiene a una temperatura inferior a la del refrigerante. En el condensador, el refrigerante o pierde entalpía de recalentamiento, entalpía de evaporización, o de calor latente de vaporización, y, si el líquido es sobre enfriado, parte de la entalpía del líquido. En esta etapa de este ciclo real (no solamente la del compresor), el proceso es irreversible.

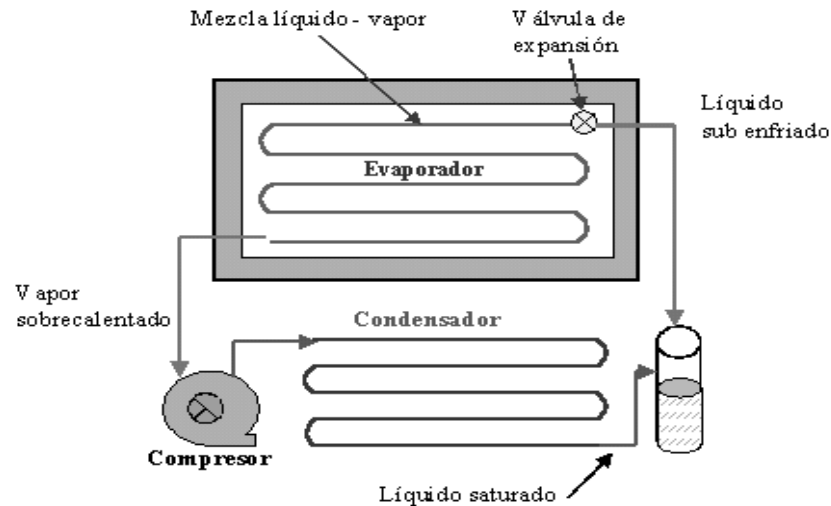


Podemos describir la figura en función de los siguientes términos.

- Estrangulación del líquido saturado desde “a” hasta “b”
- Vaporización del refrigerante líquido desde “b” hasta “c”, para dar vapor saturado seco en “c”.
- Compresión seca del vapor desde “c” hasta “d”, para producir cierto recalentamiento en “d”, y la evacuación del recalentamiento y de la entalpía de vaporización para dar refrigerante saturado líquido en “e”. Cuando en el condensador se produce sobre enfriamiento, el punto-estado del líquido viene representado por “a”, y el refrigerante que entra en el evaporador, por “hx”. Cuando el refrigerante abandona el evaporador en estado de recalentamiento, su compresión viene representada por la línea “c” y “d”. Este último tipo de funcionamiento constituye una ayuda para aumentar la cantidad de refrigeración, producida por unidad de peso de refrigerante manipulado.

Otra forma de comprender el funcionamiento global de un sistema simple de refrigeración, es imaginando la actuación del refrigerante como esponja de calor. Este funcionamiento se puede observar en la figura siguiente:

Figura 5. Sistema simple de refrigeración.



Fuente: "Refrigeración Básica", **Gases refrigerantes supersecos**, (folleto 1).

Las etapas mostradas en la figura se pueden describir a continuación:

1. Evaporación: en la etapa de evaporación, el refrigerante absorbe calor del espacio que lo rodea y por consiguiente lo enfría. Esta etapa tiene lugar en un componente denominado evaporador, el cual es llamado así debido a que, al absorber calor el refrigerante, cambia de líquido a gas, es decir, que lo evapora. Esta etapa equivale a mojar la esponja.
2. Compresión: después de evaporarse, el refrigerante es succionado por el compresor, donde se aumenta la presión. Este aumento de presión es necesario para que el gas refrigerante cambie fácilmente al estado líquido
3. Condensación: la fase de condensación del ciclo se efectúa en una unidad llamada condensador. Aquí, el gas refrigerado a alta presión cede el calor al aire, al agua o a ambos, cambiando de gas a líquido. Esta fase equivale a exprimir la esponja.

4. Válvula de expansión: la fase de control desarrollada por un mecanismo de control de flujo. Este mecanismo regula el flujo de refrigerante dentro del evaporador, y también actúa como trampa de presión. Después de que el refrigerante deja el control de flujo, se dirige al evaporador y comienza de nuevo el ciclo.

## **1.4. Compresores**

### **1.4.1. Funciones del compresor en el sistema de refrigeración**

Las funciones del compresor en el sistema de refrigeración son tres:

- 1- Crea la diferencia de presión requerida; esta es la primera de las tres funciones desarrolladas por los compresores. Hay que recordar que el refrigerante evaporado bajo presión, y la parte de condensación a alta presión. De acuerdo con esto, a la posición del sistema en el lado de succión del compresor se llama "lado bajo", mientras que a la sección del sistema en el lado de descarga del compresor, se llama "lado de alta".
- 2- Alimenta un volumen suficiente de refrigerante; esta es la segunda de las tres funciones desarrolladas por el compresor; el volumen suficiente depende de la temperatura de operación. A menos temperatura de operación, mayor volumen de refrigerante deberá circular.

Esto significa que se necesita un compresor más grande para enfriar una carga dada a una temperatura muy baja, que para enfriar la misma carga a temperatura moderadamente baja. O bien, que un compresor puede funcionar a una velocidad fija bombeando un volumen constante, pero su capacidad de enfriamiento varía, es decir que un compresor, manejando ocho toneladas a 40° F (4° C), puede manejar únicamente cuatro toneladas 0° F (-17 ° C), y una tonelada a -40° F; esto afecta el funcionamiento del motor debido a la variación de carga. Un compresor que produce una temperatura en el evaporador de 40° F (4° F), opera a gran capacidad y representa una gran carga para el motor.

3. Deben ser los más adecuados al refrigerante utilizado; la tercera función de cualquier compresor es ser el más indicado para el refrigerante que se use. El refrigerante afecta el diseño del compresor en detalles, tales como: el tamaño de las válvulas, la tensión de los resortes de las válvulas y el diseño del sistema de enfriamiento. Algunos refrigerantes como el amoníaco pueden necesitar agua o chaquetas de enfriamiento, mientras que el diseño de compresores para refrigerantes que no se calientan demasiado como el R-12, puede requerir únicamente de aletas de enfriamiento. Los materiales de construcción también influyen; el amoníaco, por ejemplo, ataca al cobre o a sus aleaciones si hubiera humedad presente; el refrigerante 12 y otros similares atacarían algunos tipos de plásticos o hules.

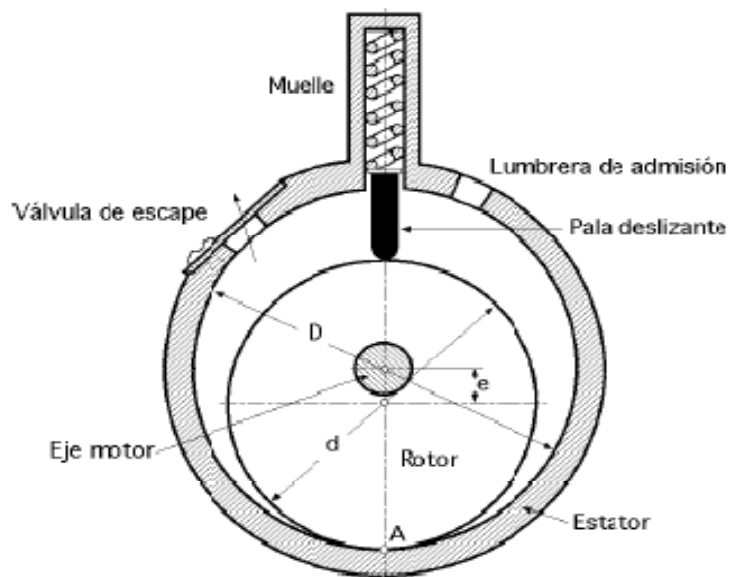
#### **1.4.2 Tipos de compresores y sus aplicaciones**

Los compresores para refrigeración y aire acondicionado se pueden clasificar en tres tipos:

### 1.4.2.1 Compresor Rotatorio

Este compresor es conocido por su larga vida, funcionamiento suave y mínimos problemas. En lugar de un pistón central con movimientos ascendente y descendente tiene un motor excéntrico que gira dentro de una cámara de compresión, la cual tiene a su vez válvulas de entrada y salida y unas aletas sostenidas contra el rotor por medio de un rotor excéntrico y las paredes de la cámara. Los compresores rotativos son usados en algunas aplicaciones domesticas e industriales.

Figura 6. Compresores rotatorios



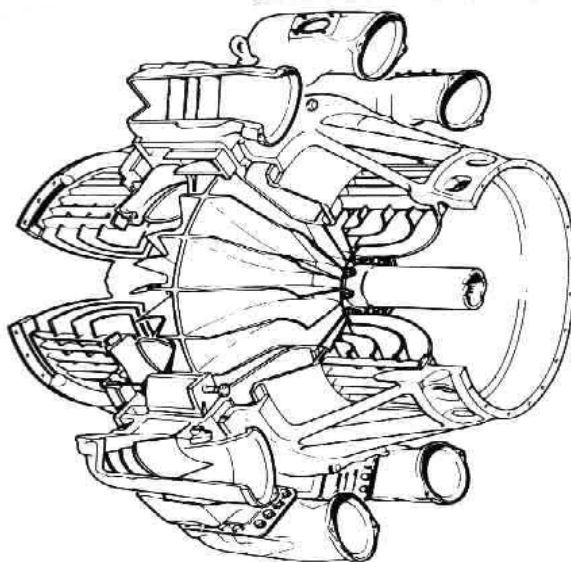
Fuente: "Refrigeración Básica", **Gases supersecos**, folleto1.

### 1.4.2.2 Compresor centrífugo

El compresor centrífugo aumenta la presión del gas no por compresión, como en otros metros, sino por el movimiento acelerado producido por la acción de un impelente a alta velocidad. Es apropiado para refrigerantes que operan a baja presión y gran volumen, como el R-11. Son empleados en grandes sistemas con cincuenta toneladas o más, como aire acondicionado de oficinas, edificios, hoteles, etc.

Se emplean en la industria de procesos químicos porque su construcción sencilla, libre de mantenimiento permite un funcionamiento continuo durante largos períodos.

Figura 7. Compresor centrífugo



Fuente: "Refrigeración básica", **Gases supersecos**, folleto1.

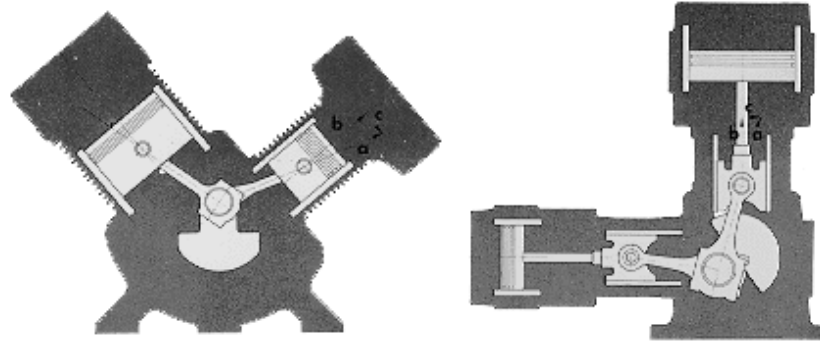
### **1.4.2.3 Compresor reciprocante**

El compresor reciprocante es el tipo mas comúnmente usado para refrigeración. Es ampliamente utilizado en uso domestico, en refrigeración comercial y en grandes sistemas industriales. Por tal razón, se profundiza en dicho tipo de compresor. Las ventajas frente a otros compresores son:

1. Adaptabilidad a diferentes refrigerantes
2. Facilidad con que permite el desplazamiento de líquido a través de tuberías dada la alta presión creada por el compresor.
3. Durabilidad
4. Sencillez de su diseño
5. Costo relativamente bajo

El diseño del compresor reciprocante es algo 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 de descarga. En vista de 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.

**Figura 8. Compresor recíprocente**



Fuente: "Refrigeración básica", **Gases supersecos**, folleto1.

Entre los compresores recíprocentes se pueden mencionar los siguientes:

#### **1.4.2.3.1 Compresores de tipo abierto**

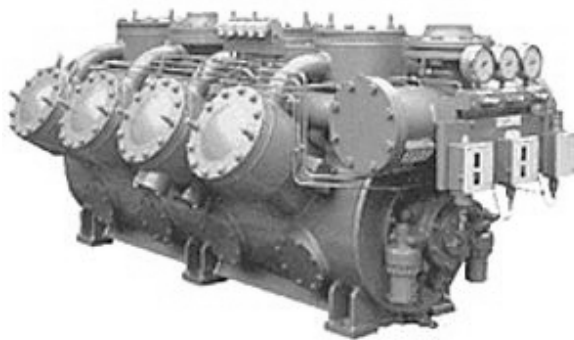
Los primeros modelos de compresores de refrigeración fueron de los llamados tipo abierto, con los pistones y cilindros sellados en el interior de un cárter, y un cigüeñal extendiéndose a través del cuerpo hacia fuera, para ser accionado por alguna fuerza externa. Un sello en torno del cigüeñal evita la pérdida de refrigerante y de aceite del compresor.

Aunque en un tiempo los compresores del tipo abierto fueron ampliamente utilizados, estos tienen muchas desventajas inherentes, como mayor peso, costo superior, mayor tamaño, vulnerabilidad a fallas de los sellos, difícil alineación del cigüeñal, ruido excesivo y corta vida de las bandas o componentes de acción directa.



De esto resulta que, en la mayoría de aplicaciones, el compresor del tipo abierto ha sido remplazado por el otro-compresor del tipo semi-hermético y hermético, el empleo del compresor del tipo abierto continua disminuyendo, excepto para aplicaciones especializadas como es el acondicionamiento del aire para automóviles.

**Figura 9. Compresor tipo abierto**



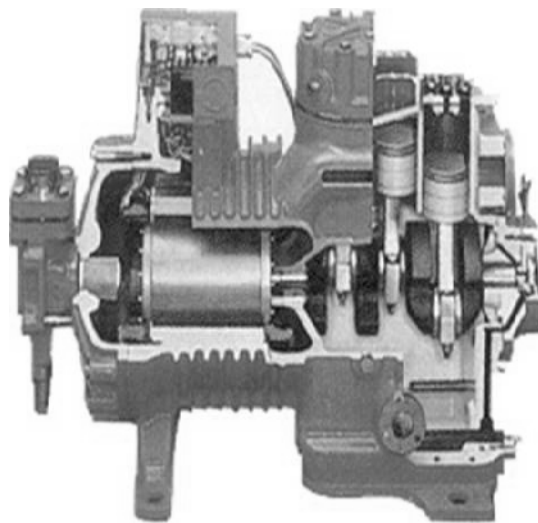
Fuente: Edward Pita, **Principios y sistemas de refrigeración**. (México: Editorial Limusa), p.98

#### **1.4.2.3.2 Compresores semi – hermético**

Este tipo de compresor es accionado por un motor eléctrico montado directamente en el cigüeñal del compresor, con todas sus partes, tanto del motor, como del compresor herméticamente sellado en el interior de una cubierta común. Se eliminan los trastornos del sello; los motores pueden calcularse específicamente para la carga que han de accionar y el diseño resultante es compacto, económico, eficiente y básicamente no requiere mantenimiento.

Las cabezas cubiertas del estator, placas del fondo y cubiertas del carácter son desmontables, y permiten e acceso para sencillas reparaciones en el caso de que se deteriore el compresor.

**Figura 10. Compresor semi-hermético**



Fuente: "Componentes de un sistema de refrigeración", **Manual de refrigeración Copeland**,

### **1.4.2.3.3 Compresores Herméticos**

El compresor hermético ha sido desarrollado en un esfuerzo para lograr una disminución del tamaño y costo; es ampliamente utilizado en equipo unitario de escasa potencia. Como en el caso del compresor semi-hermético, un motor eléctrico se encuentra montado directamente en el cigüeñal del compresor, cuyo cuerpo es una carcasa metálica herméticamente sellada con soldadura. En este tipo de compresor, no pueden llevarse a cabo reparaciones interiores, pues, la única manera de abrirlos es cortar la carcasa del compresor.

Una ventaja de los compresores herméticos es que el gas refrigerante de succión enfría el motor del compresor.

La potencia (nominal) admisible de salida de un motor disminuye a medida que aumenta la temperatura de los embobinados del mismo, para evitar el sobre calentamiento. El gas frío de succión, que fluye rápidamente sobre los embobinados, permite al motor tener menos pérdidas por calentamiento, y por tanto transmitir más fuerza de la que podría transmitir, si fuera enfriado solo por el aire ambiente estático, como sucede con un motor abierto. El resultado es que se puede utilizar un motor de menor capacidad y menos costoso con los compresores herméticos.

Sin embargo, al agregar el calor del motor al gas de succión, se tiene como resultado que la potencia requerida por este compresor sería un poco mayor que la requerida por un máquina abierta.

Otra clasificación que se da a los compresores es según la temperatura y otros factores. Los fabricantes han clasificado la gran variedad de modelos y tamaños, según el refrigerante, la capacidad y el rango de temperatura o presión (o sea la succión o presión del evaporador). La clasificación típica según temperaturas es "H" para alta "M" o "C" para media, y "L" para baja y "XL" para un rango de temperatura extremadamente bajo

## **1.5. Evaporadores**

El evaporador es la parte del lado de baja presión del sistema de refrigeración en la que el refrigerante líquido hierve o se evapora, y absorbe el calor a medida que se convierte en vapor. Con eso, se logra el objetivo del sistema, la refrigeración.

La primera etapa en la operación de un evaporador es el flujo de refrigerante líquido dentro del tubo del evaporador. El flujo puede ser hacia arriba o hacia abajo.

La segunda etapa es el intercambio de calor del aire al refrigerante, que produce dos resultados: el aire al perder el calor se enfría y el refrigerante al absorber calor se evapora. La tercera es extraer por medio del compresor los refrigerantes gaseosos del evaporador, lo que deja espacio libre para permitir la entrada de más refrigerante líquido, y mantiene una baja presión en el refrigerante líquido remanente, que permite que se evapore a una temperatura baja.

### **1.5.1. Tipos de evaporadores y sus aplicaciones**

Los evaporadores se fabrican en gran variedad de formas y estilos para satisfacer las necesidades específicas de cada aplicación.

El tipo más común es el evaporador de serpentín ventilador o de convección forzada en el que el refrigerante se evapora dentro de tubos con aletas, y extrae el calor del aire que pasa a través del serpentín mediante un ventilador.

Sin embargo, en aplicaciones específicas pueden usarse serpentines sin aletas, serpentines de gravedad con flujo de aire por convección natural, superficiales de placa lisa, u otros tipos especiales de superficie para transferencia de calor.

Los evaporadores de expansión directa son aquellos en los que el refrigerante se alimenta directamente al serpentín de refrigeración a través de un dispositivo de control que es una válvula de expansión o un tubo capilar, y absorbe directamente el calor del medio que a de enfriarse, a través de las paredes del evaporador.

En otro tipos de sistemas, pueden utilizarse refrigerantes secundarios, tales como agua enfriada o salmuera para la refrigeración del espacio o del producto, mientras que el evaporador es enfriador de agua o salmuera.

Un conjunto serpentín-ventilador típico se compone de un serpentín de expansión directa montado en un gabinete metálico y un ventilador para forzar la circulación de aire. El serpentín se construye normalmente de tubo de cobre, soportado por láminas de metal, con aletas de aluminio sobre la tubería para aumentar la superficie de transferencia de calor.

En caso de que el evaporador sea muy pequeño, podrá haber únicamente un circuito continuo en el serpentín, pero a medida que el tamaño es mayor, el incremento de caída de presión a través del circuito más largo hace necesario dividir el evaporador en varios circuitos individuales que se vacían en un cabezal común.

Los diversos circuitos se aumentan, normalmente, a través de un distribuidor que iguala la alimentación a cada circuito, con el fin de mantener elevada la eficiencia del evaporador.

El espacio entre las aletas de la tubería del refrigerante varía según la aplicación. Los serpentines para baja temperatura pueden tener pocas como por ejemplo dos aletas por pulgada.

Los factores que afectan la capacidad del evaporador son muy similares a los que afectan la capacidad del condensador.

1. Área superficial o tamaño del evaporador
2. Diferencia de temperatura entre el refrigerante que se evapora y el medio que se está refrigerando.
3. Velocidad del gas en los tubos del evaporador, dentro del gama comercial normal, a mayor velocidad, mayor transferencia de calor.
4. La velocidad y flujo sobre la superficie del evaporador del medio que se está refrigerando.
5. Material utilizado en la construcción del evaporador

6. El enlace entre las aletas y los tubos es muy importante; si no existe una unión apretada, transferencia de calos disminuirá considerablemente.
7. Acumulación de escarcha en las aletas del evaporador; el funcionamiento a temperaturas inferiores al punto de congelación con serpentines de tiro forzado, producirá la formación de hielo y escarcha en los tubos y aletas. Esto puede provocar la reducción del flujo de aire sobre el evaporador y la disminución de la transferencia de calor.
8. Tipo del medio que ha de refrigerarse, el calor fluye casi cinco veces con mayor efectividad de un líquido el evaporador, que de un gas como el aire.
9. Punto de saturación del aire que entra; si la temperatura del evaporador se encuentra por debajo del punto de saturación del aire que entre, tendrá lugar una transferencia de calor latente, junto con el sensible.

## **1.6. Condensadores**

El condensador es básicamente un intercambiador de calor, en donde el calor absorbido por el refrigerante y durante el proceso de evaporación es cedido al medio de condensación. El calor cedido por el condensador es siempre mayor que el calor absorbido durante el proceso de evaporización, debido al calor de la compresión. Conforme el calor es cedido por el vapor de elevada presión y temperatura, su temperatura desciende al punto de saturación, y el vapor se condensa convirtiéndose en líquido, de ahí el nombre de condensador.

La operación de un condensador es justamente contraria a la de un evaporador. El gas refrigerante caliente y a alta presión cede calor a los alrededores, sea agua o aire y se condensa y almacena hasta que se necesite en el evaporador.

El refrigerante licuado puede ser almacenado en un recipiente separado llamado depósito de líquido. Los condensadores frecuentemente son suministrados en combinaciones con un compresor, cuando se fabrican como un componente unitario, se llama unidad condensadora.

El condensador debe ser del tamaño adecuado para eliminar todo el calor añadido al refrigerante. Esto supone un gran trabajo, pues no solo incluye la eliminación del calor absorbido en el evaporador, sino también el calor durante la compresión.

### **1.6.1. Tipos de condensadores y sus aplicaciones**

#### **1.6.2.1. Condensadores enfriados por aire**

El condensador mas comúnmente usado con aletas en su exterior, las cuales disipan el calor al aire ambiente. A excepción de unidades domesticas muy pequeñas, las cuales dependen de la circulación del aire ambiente por gravedad, la trasferencia de calor se lleva a cabo, de modo eficaz, forzando grandes cantidades de aire a través del condensador.



Los condensadores enfriados por aire son fáciles de instalar, baratos de mantener, no requiere agua y no tienen peligro de congelación en tiempo frío. Sin embargo, es necesario un suministro adecuado de aire fresco, y el ventilador puede crear problemas de ruido e grandes instalaciones. En regiones muy calidas, la temperatura relativamente elevada del aire ambiente puede producir presiones de condensación elevadas, sin embargo, si la superficie del condensador es adecuada, puede ser utilizado satisfactoriamente en toda clase de climas.

Cuando el espacio lo permite, los condensadores pueden fabricarse con una sola hilera de tubería, sin embargo, para lograr un tamaño más compacto, se constituyen normalmente con una área frontal relativamente pequeña y varias hileras de tubería superpuesta a lo ancho. El aire, al ser forzado a través del condensador, absorbe calor y eleva su temperatura. Por lo consiguiente, disminuye la eficacia de cada hilera subsiguientemente en el serpentín; de todos modos son frecuentemente empleados los serpentines de hasta ocho hileras de profundidad.

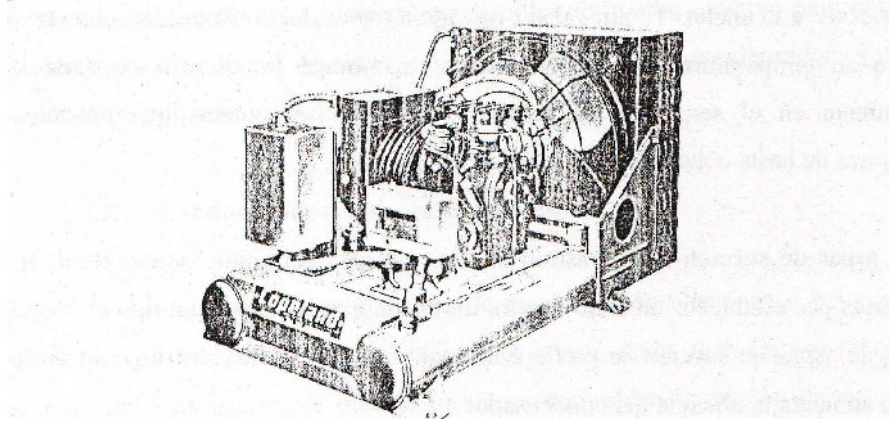
Las aspas de succión que arrastran el aire, a través del condensador, resultan más apropiadas por establecer un flujo de aire uniforme que las aspas del tipo de descarga. El tipo de aspas de succión se prefiere normalmente, pues, una distribución uniforme del aire aumenta la eficacia del condensador.

La mayoría de los sistemas de refrigeración enfriados por aire que funcionan en bajas temperaturas del ambiente son susceptibles a sufrir deterioro, debido a presiones de descarga anormalmente bajas, a menos que se establezcan medios adecuados para mantener normal la presión de descarga.

Esto sucede especialmente en unidades de vehículos refrigerados estacionados en el exterior o en “garajes” sin calefacción, esto es en sistemas de refrigeración montados en tejados o bien cualquier sistema expuesto a baja temperatura de ambiente. La capacidad de los dispositivos de control de refrigeración (válvulas de expansión, tubos capilares, etc.) depende de la diferencia de presión a través del dispositivo.

Se pueden diseñar sistemas empleando el principio de inundación parcial del condensador con refrigerante líquido, para reducir la capacidad de condensación. Con algunos de estos sistemas, se obtiene presiones de condensación muy estables, pero generalmente requiere un gran aumento en la carga de refrigerante que puede producir problemas en el funcionamiento del sistema. La restricción de flujo de aire en el condensador por medio de compuertas es también un medio efectivo para controlar la presión de condensación. Arrancar y parar el ventilador del condensador es un medio de control sencillo, pero menos efectivo.

**Figura 11. Condensador enfriado por aire**



Fuente: "Refrigeración básica", **Gases supersecos**, folleto1.

### **1.6.2.2. Condensadores enfriados por agua**

Cuando se encuentra disponible agua de condensación adecuada a bajo costos, son preferibles los condensadores, enfriados por agua, dado que tienen presiones de condensación mas bajas y es posible un mejor control de la presiones de descarga.

El agua, especialmente de manantiales, es generalmente mucho más fría que la temperatura del aire durante el día. Si se utilizan torres de enfriamiento, la temperatura del agua de condensación puede ser bajada a un punto muy cercano a la temperatura ambiente del bulbo húmedo. Esto permite la continua recirculación del agua de condensación, y reduce el consumo de esta al minuto.

Los condensadores enfriados por agua pueden ser muy compactos por las excelentes características de transferencia del calor que posee el agua. Se utilizan diversos tipos de construcción, incluyendo el de casco y serpentín, casco y tubo, y tubo dentro de tubo. Normalmente, el agua de enfriamiento se desplaza a través de tuberías o serpentines en el interior de una carcasa sellada en la que se descarga el gas caliente procedente del compresor. Una vez condensado el refrigerante, este puede salir por la línea de líquido siendo de este modo innecesario el empleo de un recipiente separado.

Una válvula de control de agua modulada con un elemento sensible a la presión o a la temperatura puede ser utilizada para mantener las presiones de condensación dentro de la gama deseada mediante el aumento o disminución de flujo de agua, según sea necesario.

Los circuitos de enfriamiento de compresor con camisas de agua y en condensadores enfriados por agua pueden instalarse en serie o en paralelo, según lo requiera cada aplicación en particular. El empleo de conexiones en paralelo, según lo requiera cada aplicación en particular. El empleo de conexiones en paralelo procede una menor caída de presión, a través del circuito y puede ser necesario cuando el aumento en la temperatura del agua de enfriamiento debe mantenerse al mínimo.

### **1.6.2.3. Condensadores evaporativos**

Los condensadores de evaporación se utilizan frecuentemente cuando se desean temperaturas de condensación inferiores a las que pueden obtenerse con condensadores enfriados por aire, y en donde el suministro de agua no es adecuado para una intensa utilización.

El vapor de refrigerante caliente fluye a través de tuberías dentro de una cámara con rociadores de agua, en donde es enfriado mediante la evaporación del agua que entre en contacto con los tubos de refrigerante.

EL agua que se expone al flujo de aire en una cámara con rociadores se evapora rápidamente. El calor latente requerido para el proceso de evaporación se obtiene mediante una reducción en el calor sensible y, por consiguiente, mediante una reducción de la temperatura del agua. Una cámara de evaporización con rociadores puede reducir la temperatura del agua a un punto que se aproxima a la temperatura del bulbo húmedo del aire.

Puesto que el enfriamiento se realiza mediante la evaporación de agua, el consumo de agua se reduce a una fracción de la que se utiliza en sistemas de enfriamiento en los que el agua después de utilizarse se descarga a un drenaje; La corrosión, incrustación y el peligro de congelación son problemas que deben resolverse, tanto en los condensadores evaporativos, como en los de enfriamiento por agua.

En las torres de enfriamiento y en los condensadores evaporativos debe instalarse un sistema de drenaje continuo para evitar la concentración de contaminantes en el agua de enfriamiento.

La capacidad de transferencia de calor de un condensador depende de varios factores.

1. Superficie del condensador
2. Diferencia de temperatura entre el medio enfriador y el gas refrigerante
3. Velocidad del gas refrigerante en los tubos del condensador, en la gama de funcionamiento comercial normal, a mayor velocidad, mejor transferencia de calor y mayor capacidad.
4. Volumen de flujo de medio enfriante sobre o a través del condensador, la transferencia de calor aumenta con la velocidad, tanto para el aire como para el agua, y, en el caso del aire, aumenta con la densidad.
5. El material con el que se ha construido el condensador, puesto que la transferencia de calor es diferente en materiales distintos, los metales más eficaces aumentarían la capacidad.
6. Limpieza de la superficie de transferencia de calor, la suciedad, incrustación o corrosión, pueden reducir la transferencia de calor. O para un condensador dado, se fijan las características físicas y, la variable primaria es la diferencia de temperaturas entre el gas refrigerante y el medio enfriante.



## 2. AUTOMATIZACIÓN

### 2.1 ¿Por qué automatizar?

Porque las empresas deben prepararse para enfrentar el futuro o serán cosa del pasado. Para producir con los mismos recursos, aumento de los tiempos muertos, prolongar la vida útil de los equipos. El aumento de competitividad, la globalización de economía e informática son cambios drásticos para Guatemala. Y nos hacemos parte, queriendo o no de este contexto mundial. Hay empresas que están investigando incansablemente la automatización de tarifas para la reducción de costos de ventas o producción.

La automatización de instalaciones a base de elementos eléctricos está fundamentada en el control y ejecución de acciones de forma automática, sin la intervención del operador o con el mínimo de intervención. Con ello se logra agilizar los procesos, una mayor eficiencia y con ello bajan los costos de operación y al mismo tiempo se tiene confianza en la continuidad del servicio. Aparte de ello se tiene un fácil manejo y mantenimiento en el equipo de operación, y una reducción de espacios en el equipo de control.

La automatización puede ser tan completa con un sistema SCADA, (*Supervisory Control And Data Acquisition*, por sus siglas en inglés), que está especialmente diseñada para funcionar sobre computadoras en el control de producción proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.).



Además, provee de toda la información que se genera en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como de otros supervisores dentro de la empresa: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc. En este tipo de sistemas usualmente existe un PLC que efectúa tareas de supervisión y gestión de alarmas, así como tratamiento de datos y control de procesos. O tan sencilla con elementos de telemando, y lógica cableada.

## **2.2. Costos de la automatización**

El costo de la automatización depende del proceso de producción a trabajar y de lo que se quiere lograr con la automatización. Los sistemas de automatización van desde controles con contactores a base de lógica cableada, pasando por PLC's hasta llegar a sistemas SCADA.

En el mercado existen una gama muy amplia de autómatas programables, por lo que estas se elegirán atendiendo a:

- a) Necesidades a cubrir en función al volumen de la instalación.
- b) Prestaciones del autómata.
- c) Precio y calidad del producto.
- d) Marca del producto.
- e) Proximidad del proveedor.
- f) Asistencia técnica.

### **2.3. Tiempos requeridos para la automatización**

Para determinar el tiempo requerido, los pasos a seguir y el costo de un proyecto de automatización se debe estudiar detenidamente el proceso que realiza el proceso de producción. Generalmente se tendrán los mismos procedimientos para la automatización pero dependerá de la complejidad del proceso, el nivel de automatismo y del tamaño de la maquinaria, de estos dependerá de gran manera el tiempo para realizar el proyecto.

### **2.4. Ventajas y desventajas de la automatización**

La utilización de autómatas programables supone una serie de ventajas y desventajas algunas de las cuales se enumeran a continuación.

- a. Mayor nivel de automatismo, control y simplicidad en los procesos en los que interviene.
- b. Facilidad a los operarios de las máquinas en las operaciones de maniobra.
- c. Mejorar el control del proceso.
- d. Permite introducir cambios rápidos en las maniobras y procesos que controla.
- e. Controla y protege los aparatos eléctricos.
- f. Ayuda con mensajes para el control de las averías.
- g. Ayuda al mantenimiento.
- h. Puede estar unido a PC que controlen los procesos.
- i. Tener salidas de información a impresoras y pantallas de TV.

- j. Reducir el volumen de los automatismos.
- k. Aumentar el grado de seguridad de las instalaciones que controla.
- l. Obtener mayor productividad de las máquinas o instalaciones.
- m. Otras muchas prestaciones que hacen que el autómatas programable se esté generalizando a todos los niveles y aplicaciones.

Entre las desventajas que presentan los autómatas mencionamos:

- a. Falta de un programador (equipo y personal calificado)
- b. Alto costo en caso de procesos muy sencillos.
- c. Se requiere de un diagrama de procesos, el cual involucra agentes multidisciplinarios (mecánicos, eléctricos, neumáticos, etc.), para el diseño de entradas y salidas.

## **2.5. Equipos utilizados en la automatización**

La demanda en la industria de un sistema económico, flexible, fácilmente modificable y con mayor facilidad para tratar con tensiones y corrientes fuertes que lo que utilizaba la PC, hizo que se desarrollaran los autómatas programables industriales, abreviadamente PLC

Los primeros autómatas pretendían básicamente, sustituir sistemas convencionales o relés o circuitos lógicos, con las ventajas evidentes que se suponía tener un hardware estándar.

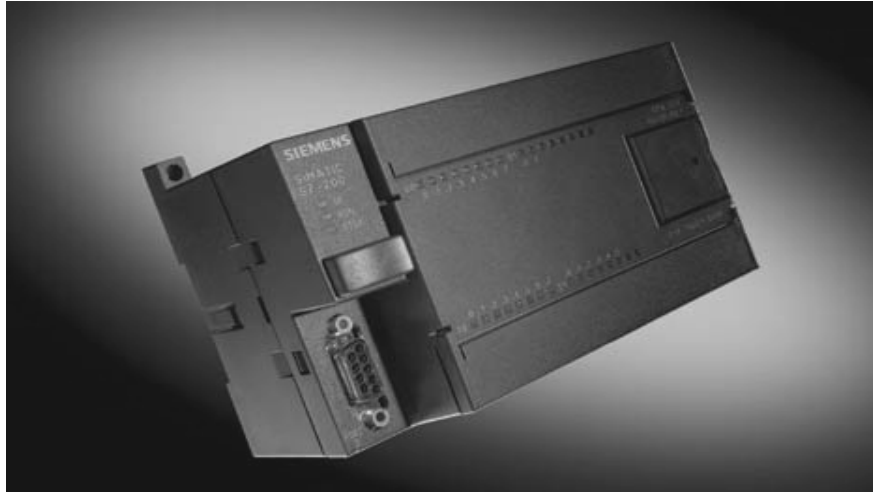
Por ellos nacieron con prestaciones muy similares a las que ofrecían dichas tecnologías convencionales y sus lenguajes de programación eran muy próximos a los esquemáticos empleados en las mismas

### **2.5.1. Autómatas programables (PLC)**

El autómata programable PLC, (Programmable Logic Controller), es un conjunto de elementos industriales que construyen un equipo electrónico a través del cual pueden controlarse a tiempo real procesos secuenciales para aplicaciones industriales de muy diversos tipos. Ha supuesto una innovación tecnológica muy importante en el campo de los automatismos eléctricos, sustituyendo a las funciones lógicas, que durante un cuarto de siglo, ha sido la base de los automatismos industriales.

Es el corazón de la actual automatización de instalaciones, ya que es el elemento al que llega y controla la información y después distribuye las señales a los actuadores para que ejecute órdenes de realización. En general están en constante evolución, ahí están los variadores de velocidad para motores de c.a, para motores c.c., arrancadores estáticos, controladores electrónicos y otros.

**Figura 12. Autómata Programable (PLC)**



Fuente: **Programar con STEP 7 V5.1**, manual Siemens

La capacidad de un PLC está directamente relacionada con la velocidad de ejecución del programa y las variables tratadas. Un PLC del mercado actual tarda unos 0,15 ms por cada instrucciones, o sea que el resultado aceptable para el control de cualquier automatismo. El fin de dicha ejecución es provocar el cambio de las variables tratadas. Este cambio sobre las variables se realiza antes, durante y al final del programa.

Antes del programa se realiza la lectura de las entradas (inicio de ciclo), al final se realiza la escritura de las salidas (fin de ciclo y enlace con el inicio). Durante la ejecución del programa se realiza la lectura y/o escritura de las variables internas según el contexto programado. El programa se interrumpen por instrucciones para realizar otras tareas consideradas prioritarias, pero el aspecto más importante es la garantía de ejecución completa del programa principal.

Otro punto importante es la programación del PLC. Se tiende a programar con software para PC actuales, se utilizan entornos gráficos intuitivos, agradables. Esto implica un conocimiento, en la mayoría de los casos de una PC, casi siempre portátil, con el fin de depurar el programa desarrollado en la propia instalación. Otra forma de programar es una pequeña consola, la cual nos va a permitir una mayor autonomía; el desembolso, en un principio es menos costoso que una PC.

El mayor problema estriba en que estas consolas, hoy día, están pensadas para programar PLC's pequeños (de hasta 48 E/S). Es evidente que en PLC's superiores una programación con estas consolas se convierte en un proceso tedioso ya que se visualizan, normalmente, una o dos líneas del programa escrito. Estas consolas sí tienen utilidad, para modificar datos, bien de autómatas pequeños como de un calibre superior.

### **2.5.1.1 Bloques esenciales de un autómata**

Un autómata es compone esencialmente de los siguientes bloques:

Unidad central de proceso o de control (CPU)

Memoria internas

Memoria de programación

Interfaces de entrada y salida

Fuente de alimentación

La unidad de control consulta el estado de las entradas y recoge de la memoria de programa la secuencia de instrucciones a ejecutar, elaborando a partir de ella las señales de salida u ordenes que enviara al proceso. Durante la ejecución del programa, las instrucciones son procesadas en serie, una tras otra. La unidad de control es también la responsable de actualizar continuamente los temporizadores y contactores internos que hayan sido programados.

La memoria del autómeta contiene todos los datos e instrucciones que se necesita para ejecutar tareas de control.

La memoria interna es la encargada de almacenar datos intermedios de cálculo y variables internas que no aparecen directamente sobre las salidas, así como un reflejo o imagen de los últimos estados leídos sobre las señales de entrada o enviados a las señales de salida.

La memoria de programa contiene la secuencia de operaciones que deben realizarse sobre las señales de entrada para obtener las señales de salida, así como los parámetros de configuración del autómeta. Por ellos si hay que introducir alguna variación sobre el sistema de control basta generalmente con modificar el contenido de esta memoria.

Las interfaces de entrada y salida establecen la comunicación del autómeta con la planta.

Para ello se conectan por una parte, son las señales de proceso a través de los bornes previstos y, por otra, con el bus interno del autómatas. La interfaz se encarga de adaptar las señales que se manejan en el proceso a las utilizadas internamente por la maquina. Entre estas podemos distinguir dos tipos las análogas y digitales.

Las análogas leen un valor analógico e internamente lo convierten en un valor digital para su procesamiento en la CPU. Esta conversión la realizan los convertidores analógico-digitales internos de las tarjetas que en algunos casos es uno para todos los canales de entrada o salida aunque actualmente se tiene uno por cada canal; Los rangos de entrada están normalizados siendo de más frecuencia de 4-20 ma, sin importar la carga, ya que están a prueba de corto circuito, y 0-10 DCV, aunque también existen de 0-20 ma, 1-5V, 0-5V, etc.

Las digitales transmiten los estados 0 ó 1 del proceso (presostatos, finales carrera, detectores, conmutadores, etc.) a la CPU. En el caso de las salidas, la CPU determina el estado de las mismas tras la ejecución del programa y las activa o desactiva en consecuencia; Normalmente se utilizan tarjetas de entradas de 24 DCV y salidas de 24 DCV, aunque también las hay de 110 y 220 VAC, depende de las preferencias y normativas locales. Las hay de 8, 16 y 32 entradas o salidas o mezclas de ambas.

La fuente de alimentación proporciona, a partir de una tensión exterior, las tensiones necesarias para buen funcionamiento de los distintos circuitos electrónicos del sistema.

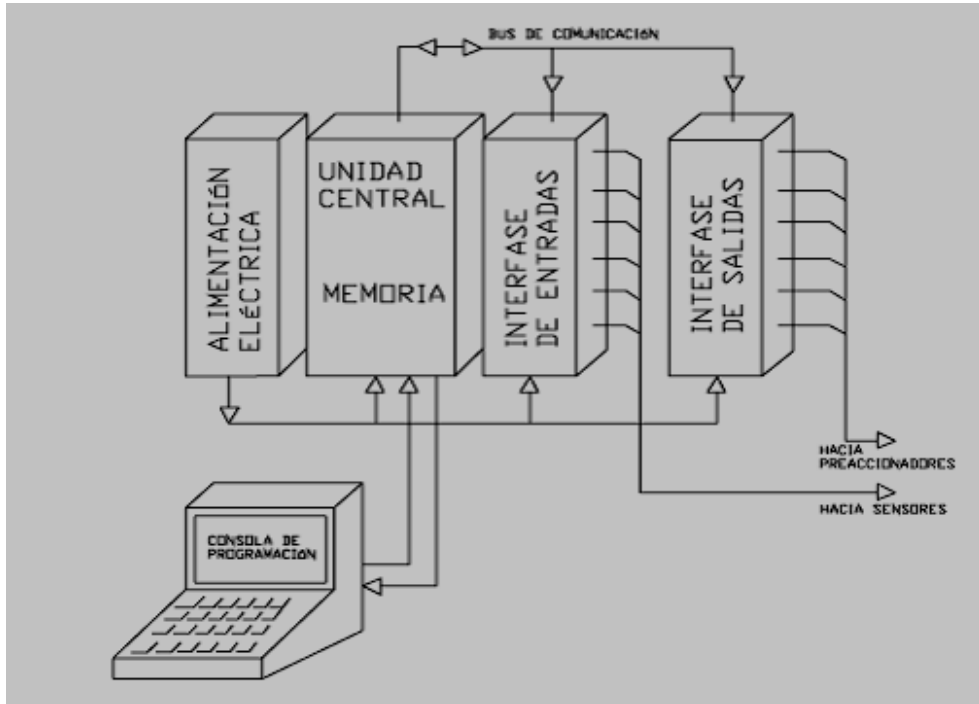


En ocasiones el autómata puede disponer de una batería conectada a esta fuente de alimentación, lo que asegura el mantenimiento del programa y algunos datos en las memorias en caso de interrupción de la tensión exterior.

Se conoce como bus interno al conjunto de líneas y conexiones que permiten la unión eléctrica entre la unidad de control, las memorias y las interfaces de entrada y salida. Un bus se compone de un conjunto de hilos o pistas utilizadas para intercambiar datos u ordenes. Para minimizar el número de conexiones y dado que la unidad de control, que organiza el tráfico por estos hilos solo pueden comunicarse por sus periféricos de una forma secuencial, uno tras otro, el conjunto de hilos del bus en común y compartirlo por todos ellos.

Esta estructura exige que en todo momento solo pueda haber un periférico ocupando el bus, ya que de lo contrario se mezclarían los datos enviados por varios de ellos o se recibirían en un periférico datos que no le correspondan. Los tres buses característicos de un sistema digital se muestran en la figura 13, bus datos, por el que tienen lugar la transferencia de datos del sistema, bus de direcciones, a través del cual se direcciona la memoria y el resto de los periféricos y bus de control, constituido por todas las conexiones destinadas a gobernar los intercambios de información, se reunifican en el autómata en uno solo, que recibe el nombre de bus interno. El número de líneas de este bus depende del fabricante.

Figura 13. Estructura de Autómata



### 2.5.1.2. Comunicación

La interfaz de comunicación se encarga de la transferencia de información entre hombre máquina, entre ésta y es resto de elementos en gestión a través de puertos y buses, constituyendo así algún tipo de red.

Hay varios tipos de redes con las cuales se pueden conectar los PLC's:

**a) Redes locales (LAN),** son aquellas que conectan una red de ordenadores normalmente confinadas en un área geográfica, como un solo edificio o un campus de la universidad.

El desarrollo de varias normas de protocolos de red y medios físicos han hecho posible la proliferación de LAN's en grandes organizaciones multinacionales, aplicaciones industriales y educativas.

**b) Redes de área extensa (WAN)**, a menudo una red se localiza en situaciones físicas múltiples. Esto se realiza conectando las diferentes LAN's mediante servicios que incluyen líneas telefónicas alquiladas (punto a punto), líneas de teléfono normales con protocolos síncronos y asíncronos, enlaces vía satélite, y servicios portadores de paquetes de datos.

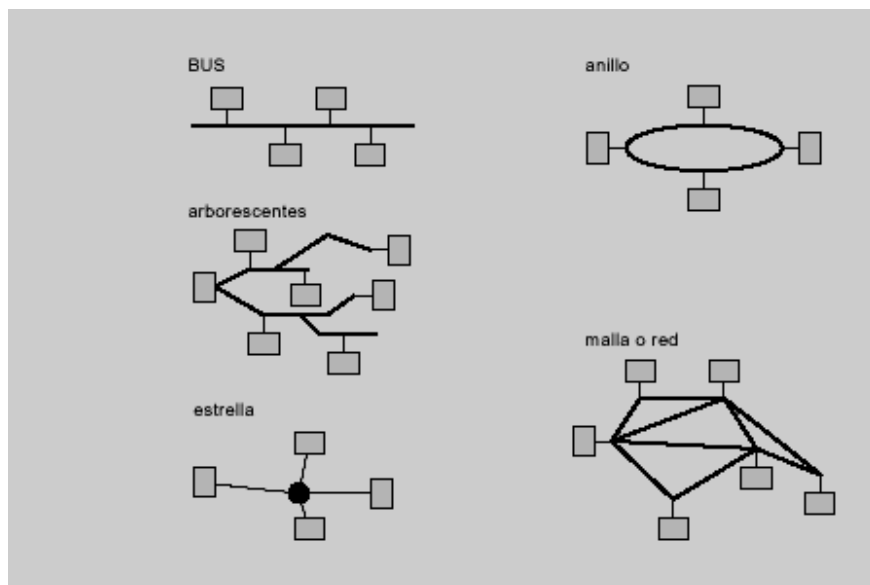
**c) Los sitios *World Wide Web* (WWW)** de Internet proporcionan ahora recursos personales, educativos, políticos y económicos a cada esquina del planeta.

**d) Intranet** es una red privada que utiliza herramientas del tipo de Internet, pero disponible sólo dentro de esa organización. Permite un modo de acceso fácil a información corporativa para los empleados a través del mismo tipo de herramientas que emplean para moverse fuera de la compañía.

**e) Ethernet** es la capa física más popular; la tecnología LAN usada actualmente. Ethernet es popular porque permite un buen equilibrio entre velocidad, costo y facilidad de instalación. Estos puntos fuertes, combinados con la amplia aceptación en el mercado y la habilidad de soportar virtualmente todos los protocolos de red populares, hacen a Ethernet la tecnología ideal para la red de la mayoría los usuarios de la informática actual.

Se diseñan redes Ethernet típicamente en dos configuraciones generales o topologías: bus y estrella. Estas dos topologías definen cómo se conectan entre sí los nodos. Un nodo es un dispositivo activo conectado a la red, como una computadora o una impresora. Un nodo también puede ser dispositivo o equipo de la red como un concentrador o conmutador.

**Figura 14. Topología de redes**



Fuente: Internet.

Los protocolos de red son normas que permiten a los ordenadores comunicarse. Un protocolo define la forma en que los ordenadores deben identificarse entre sí en una red, la forma en que los datos deben transitar por la red, y cómo esta información debe procesarse una vez que alcanza su destino final. Los protocolos también definen procedimientos para gestionar transmisiones o paquetes perdidos o dañados.

Aunque cada protocolo de la red es diferente, todos pueden compartir el mismo cableado físico. Este concepto es conocido como independencia de protocolos, lo que significa que dispositivos que son compatibles en las capas de los niveles físicos y de datos permiten al usuario ejecutar muchos protocolos diferentes sobre el mismo medio físico, con la condición que usen la misma velocidad de transferencia.

Dependiendo de la capacidad del microprocesador del autómata utilizado, la red puede asistir uno o varios de los siguientes protocolos de comunicación: interface punto a punto (PPI), es un protocolo maestro/esclavo. Los maestros (otros autómatas, unidades de programación o visualizadores de texto), envían peticiones a los esclavos y éstos últimos responden. Los esclavos no inician mensajes, sino que esperan a que un maestro les envíe una petición o solicite respuesta.

El protocolo PPI no limita la cantidad de maestros que pueden comunicarse con un autómata cualquiera que actúe como esclavo. Puede ser un protocolo maestro/maestro, o bien maestro/esclavo, dependiendo del equipo utilizado algunos autómatas siempre serán maestros, y otros serán siempre esclavos debido a su capacidad.

Un enlace (conexión privada) entre dos dispositivos, no puede ser interferido por otro maestro. Un maestro puede establecer un enlace por tiempo definido o indefinido.

Protocolo PROFIBUS (Process Field Bus, por sus siglas en inglés), se ha diseñado para una comunicación rápida con unidades periféricas descentralizadas. Hay varios dispositivos PROFIBUS ofrecidos por diversos fabricantes, que abarcan desde los módulos sencillos de entradas y salidas hasta controladores de motores y sistemas de automatización.

Las redes PROFIBUS incorporan un maestro y varios esclavos. Los maestros inicializan la red, reconocen los tipos de esclavos que están conectados, sus direcciones y verifica sus configuraciones. Una vez un maestro haya configurado correctamente a un esclavo, este último le pertenecerá. Si hay otro maestro en la red tendrá apenas un acceso limitado a los esclavos del primer maestro.

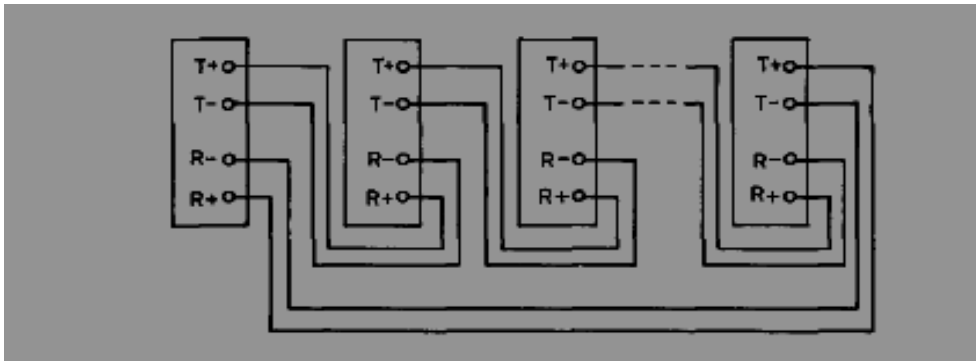
La familia PROFIBUS está compuesta de tres versiones compatibles: PROFIBUS-DP, alta velocidad, bajo costo, diseñado para la comunicación entre sistemas de control y entradas/salidas distribuidas a nivel de dispositivos. PROFIBUS-PA, conecta sensores y actuadores con un bus común, aun con seguridad intrínseca, permite datos y energía utilizando 2 cables según norma IEC1158-2. PROFIBUS-FMS, comunicaciones de alto nivel para propósitos generales.

Con tanta información pendiente de ser recogida, es evidente que se desee recoger tanta y tan rápida como sea posible. Aunque hay una amplia variedad de interfaces de comunicación, nos centraremos a la norma RS-485.

Diseñada para permitir múltiples dispositivos unidos (hasta 32 dispositivos en un segmento e red, y hasta 127 con repetidores), por una red multidrop de dispositivos serie RS-485, con la ventaja de soportar una mayor distancia (1200 metros de longitud máxima y con repetidores hasta 9600 metros), y velocidad de transmisión desde Kbit/seg hasta 12 Mbit/seg. Esto mejora lo ofrecido por las normas RS-232/RS-423 y RS-422.

El rendimiento del PLC global depende de numerosas variables complejas, no obstante dos factores básicos la determinan, la velocidad de transferencia y el número de estaciones conectadas a la red.

**Figura 15. Enlace RS-422 en anillo físico**



Fuente: José Luis R, **Autómatas Programables**, (Editorial: Alfa y Omega, México 1998), pág., 290.

## **2.6. Software utilizado en la automatización**

El software corresponde al programa específico de una determinada instalación. La programación se realiza con lenguajes enfocados a la industria (como es la electricidad, electrónica, neumática, hidráulica, etc.), y basados en los mismos principios que los esquemas que se realizan con relés, lógica cableada o paso a paso.

En el programa se designan mediante direcciones los registros, los contadores, los temporizadores, entradas y salidas. En los PLC's pequeños estas direcciones comúnmente están asignadas por el fabricante, pero en los mayores, pueden ser definidas por el programador, con mayor aprovechamiento de la memoria. Un PLC debe ser capaz de iniciar su programa siempre que exista una falla de energía, por lo que todas las eventualidades deben ser programadas en él.

Debido a la complejidad en la programación de los autómatas programables requiere la estandarización de la misma. Bajo la dirección del IEC el estándar IEC 1131-3 (IEC 65) para la programación de PLC's, alcanzó el estado de Estándar Internacional en agosto de 1992. Los lenguajes gráficos y textuales definidos son una fuerte base para entornos de programación potentes en PLC's. Con la idea de hacer el estándar adecuado para mayores aplicaciones, cinco lenguajes han sido definidos en total:



- a. Gráfico secuencial de funciones (grafcet).
- b. Lista de instrucciones (LDI o AWL).
- c. Texto estructurado.
- d. Diagrama de contactos (KOP)
- e. Diagrama de flujo.

### **2.6.1. Gráfico secuencial de funciones (grafcet)**

El gráfico secuencial de funciones (SFC o grafcet) es un lenguaje gráfico para describir ciclos automáticos mediante símbolos. Desarrolla los automatismos de una forma simple y de fácil comprensión para el que analiza esta representación gráfica; Soporta selecciones alternativas y secundarias paralelas; Los elementos básicos son etapas y transiciones. Una etapa puede ser inactiva o activa.

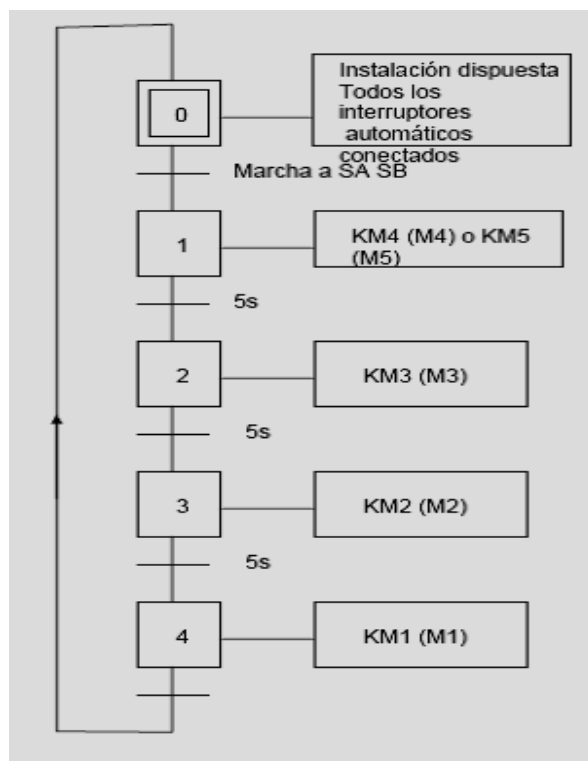
En todo el grafcet solo una etapa puede ser activa en un momento dado. Para que una etapa sea activa ha tenido que preceder una transición en la que se han producido unas acciones. El franqueamiento de una transición provoca el paso de una etapa a otra dentro del ciclo de mando. Una transición es válida cuando ya han sido activas las transiciones anteriores.

Este lenguaje fue inventado por ingenieros de la marca francesa Telemecanique, y posteriormente se hizo lenguaje estándar IEC, y son ahora muchos los fabricantes que tienen su propia versión; Este lenguaje es muy

apropiado para el manejo de posicionadores, alimentadores, y todo aparato cuyos movimientos mecánicos sean repetitivos.

En la figura 16, se muestra un ejemplo del gráfico secuencial de funciones de cuatro motores con encendido retardado entre cada uno de 5 segundos.

**Figura 16. Grafico secuencial de funciones**



### **2.6.2. Lista de instrucciones (LDI o AWL)**

La lista de instrucciones (IL o AWL) es un lenguaje de bajo nivel, en el que cada línea del programa contiene una operación que utiliza una abreviatura nemotécnica para representar una función de la CPU, (ejemplo, almacenar un valor en un registro). Las operaciones se unen y combinan en un programa, creando así la lógica de control de la aplicación.

Las operaciones AWL hacen uso de una pila lógica en la CPU para resolver la lógica. Leen sólo los valores de la pila lógica, muchas otras modifican también los valores ahí almacenados.

Este lenguaje es adecuado para pequeñas aplicaciones y para optimizar partes de una aplicación. Es el preferido por los ingenieros europeos. Son los más matemáticos de los lenguajes, al requerirse manejo de tablas de verdad y simplificación de funciones lógicas booleanas para su empleo.

Figura 17. Elementos básicos de programa AWL

```
//Programa para tren transportador
NETWORK //Marcha del motor:
LD "Marcha1" //Si I0.0 está activada (on)
AN "Paro_Em1" //e I0.1 no está activada ,
= Q0.0 //poner en marcha el motor del transportador

NETWORK //Paro de emergencia transportador
LD I0.1 //si Paro_Em1 está activada
O I0.3 //o si Paro_Em2 está activada,
R Q0.0, 1 //parar el motor del transportador.

NETWORK //Fin del programa
MEND
```

### 2.6.3 Texto estructurado

El texto estructurado (structured text o ST, por sus siglas en inglés) es un lenguaje de alto nivel estructurado por bloques que posee una sintaxis parecida al PASCAL.

El ST puede ser empleado para realizar rápidamente sentencias complejas que manejen variables con un amplio rango de diferentes tipos de datos, incluyendo valores analógicos y digitales. También se especifica tipos de datos para el manejo de horas, fechas y temporizaciones, algo importante en procesos industriales. El lenguaje posee soporte para bucles iterantes, ejecuciones condicionales empleando sentencias If-then-else y funciones como SQRT() y SIN().

Comprende tres partes básicas: el programa principal, que es la parte del programa que dispone las operaciones que controlan la aplicación, en forma secuencial en cada ciclo de la CPU.

Las subrutinas, estos elementos opcionales del programa se ejecutan sólo cuando se llaman desde el programa principal; y las rutinas de interrupción, son elementos opcionales del programa se ejecutan cada vez que presente el correspondiente evento de interrupción.

#### **2.6.4. Diagrama de contactos**

El diagrama de contactos (Ladder Diagram LD, por sus siglas en inglés) es un lenguaje que utiliza un juego estandarizado de símbolos de programación. En el estándar IEC los símbolos han sido racionalizados (se ha reducido su número).

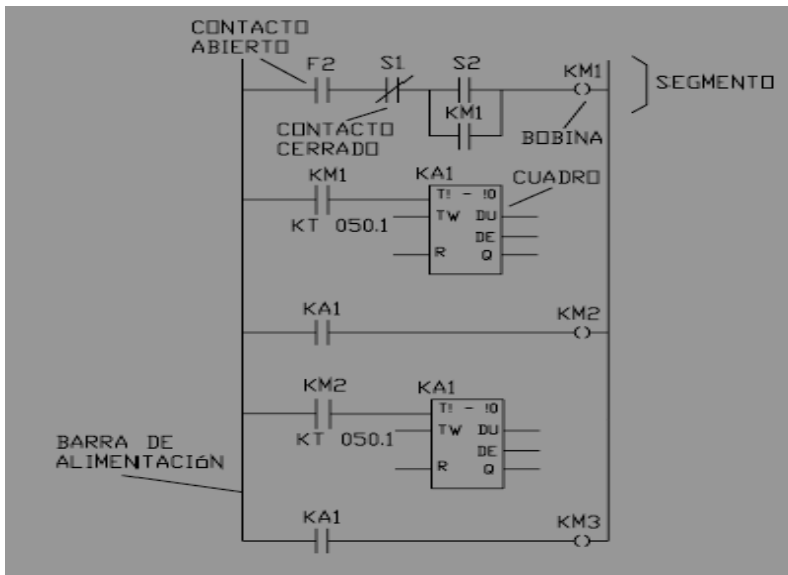
Es el más conocido en el área de influencia norteamericana, ya que invariablemente todos los PLC de fabricación americana o japonesa permiten su programación en este lenguaje; ya sea para emplear los mismos diagramas de control alambrado existentes en las máquinas que se reconvierten o, ya sea para capacitar fácilmente al personal de mantenimiento en el manejo y arreglo de estos aparatos.

Los elementos principales representados en la figura 18, son contactos, bobinas, cuadros y segmentos.

Un contacto representa un interruptor por el que circula corriente cuando está cerrado, pueden ser entradas digitales, salidas digitales y marcas, también llamadas banderas o memorias internas. La bobina representa un relé que se excita cuando se le aplica tensión. Es el resultado de la operación y enciende cuando las condiciones precedentes se cumplen, o en términos eléctricos, existe un camino de contactos en serie cerrados. Existen dos tipos de bobinas, retentiva y no retentiva.

Un cuadro representa una función que se ejecuta cuando la corriente circula por él. Pueden ser temporizadores, contadores. Y los segmentos son electos que constituyen un circuito completo. La corriente circula desde la barra de alimentación izquierda pasando por los contactos cerrados para excitar las bobinas o cuadros.

**Figura 18. Elementos básicos de programación con diagramas de contactos**

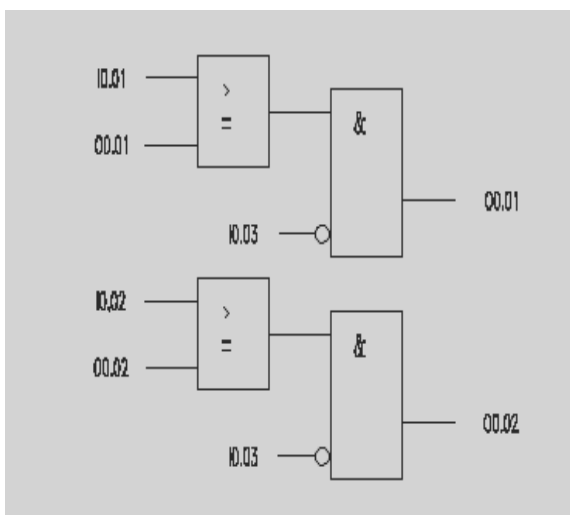


### 2.6.5. Diagrama de flujo

El diagrama de funciones (Function Block Diagram o FBD, por sus siglas en inglés) es un lenguaje gráfico que permite programar elementos que aparecen como bloques para ser cableados entre si de forma análoga al esquema de un circuito. FBD es adecuado para muchas aplicaciones que involucren el flujo de información o datos entre componentes de control. Es el tipo más poderoso de los lenguajes de programación en cualquier marca de aparato, ya que es lo más cercano al lenguaje máquina y, puede hacer uso de particularidades de los mismos microprocesadores, y con ello hacer más rápido un programa o, más compacto.

Los bloques de funciones (FB's) son bloques estándar que ejecutan algoritmos. Utiliza operadores lógicos para la realización del programa: AND, OR, NOT y las instrucciones de salida de codificación nemónica.

**Figura 19. Elementos básicos de diagrama de funciones**



## **2.7. Medición de parámetros físicos**

La cadena de retroalimentación resulta impredecible en muchos automatismos industriales para poder realizar el control de lazo cerrado, con las conocidas ventajas en cuanto a cancelación de errores y posibilidad de regulación precisa y rápida, dicha cadena de retroalimentación requiere elementos de captación de las magnitudes de planta, a los que llamaremos sensores o transductores

En la actualidad, para medir cualquier variable física tenemos diversos tipos de sensores, con sus ventajas y desventajas. Éstos son tan diversos como los principios físicos en los que se basan.

Estos sensores pueden estar basados en algo simple como en la operación mecánica de un actuador o, tan complejo como en la operación de un sensor de proximidad fotoeléctrico con discriminación de color.

Los términos sensor y transductor se suele aceptar como sinónimos, aunque, si hubiera que hacer alguna distinción, el término traductor es quizás más amplio incluyendo una parte sensible o captador propiamente dicho y algún tipo de circuito de acondicionamiento de la señal.

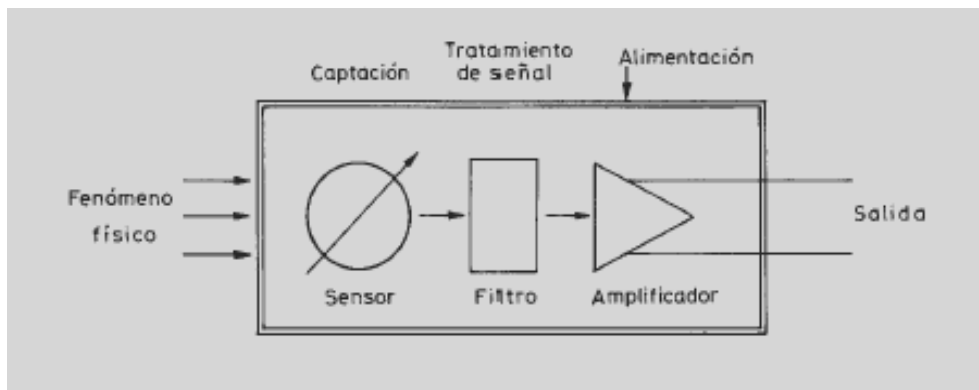
El término de transductor, suele asociarse bastante a dispositivos cuya salida es alguna magnitud eléctrica o magnética; estos generalmente tienen



una estructura como se muestra en la figura 20 en la cual podemos distinguir las siguientes partes:

- Elemento sensor o captador. Convierte las variaciones de una magnitud física en variaciones de una magnitud eléctrica o magnética, que denominaremos generalmente señal.
- Bloque de tratamiento de señal. Si existe, suele filtrar, amplificar, linealizar y en, general, modificar la señal obtenidas en el captor, por regla general utilizando circuitos electrónicos
- Etapa de salida. Esta etapa comprende los amplificadores, interruptores, conversores de código, transmisores y, en general, todas aquellas partes que adapten la señal a las necesidades de la carga exterior.

**Figura 20. Estructura genérica de un transductor**



Fuente: Fuente: José Luis R, **Autómatas Programables**, (Editorial: Alfa y Omega, México 1998), pág., 113

### **2.7.1 Detectores de proximidad**

Los detectores de proximidad pueden estar basados en distintos tipos de captores, siendo los mas frecuentes los siguientes:

- Detectores inductivos
- Detectores capacitivos
- Detectores ópticos
- Detectores ultrasónicos

Por lo general se trata de sensores todo o nada, con una cierta histéresis en la distancia de detección y con una salida a base de interruptor estático (transistor, tiristor o diac), pudiendo actuar como interruptor de CC o de CA. Pero algunos pueden llegar a dar una salida analógica proporcional a la distancia.

#### **2.7.1.1 Detectores inductivos**

Este tipo de sensores se utilizan para detectar la proximidad de piezas metálicas con un rango que va desde 1 mm a unos 30 mm.

Los sensores inductivos consisten en una bobina cuya frecuencia de oscilación cambia al ser aproximado un objeto metálico a su superficie axial.

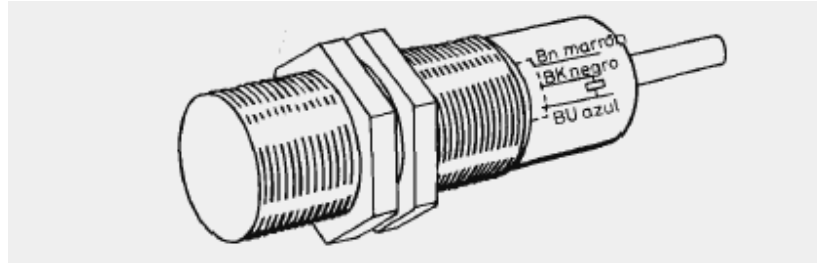
Esta frecuencia es empleada en un circuito electrónico para conectar o desconectar un tiristor y con ello, lo que esté conectado al mismo, de forma digital (on-off) o, analógicamente.

El campo de aplicación más importante de este tipo de sensores es como interruptores finales de carrera con algunas ventajas respecto a los electromecánicos, tales como ausencia de contacto con el objeto a detectar, robustez mecánica, resistencia a ambientes agresivos y altas temperaturas.

#### **2.7.1.2 Detectores capacitivos**

Este tipo de sensores permite detectar materiales metálicos o no, pero su sensibilidad se ve muy afectada por el tipo de material y por el grado de humedad ambiental y del cuerpo a detectar. Por ello se utilizan exclusivamente como detectores todo o nada, con una repetitividad bastante dependiente de las condiciones ambientales,; las aplicaciones típicas son, sin embargo, la detección de materiales no metálicos como vidrio, cerámica, plástico, madera, aceite, agua cartón, papel, etc.

**Figura 21. Detector capacitivo**



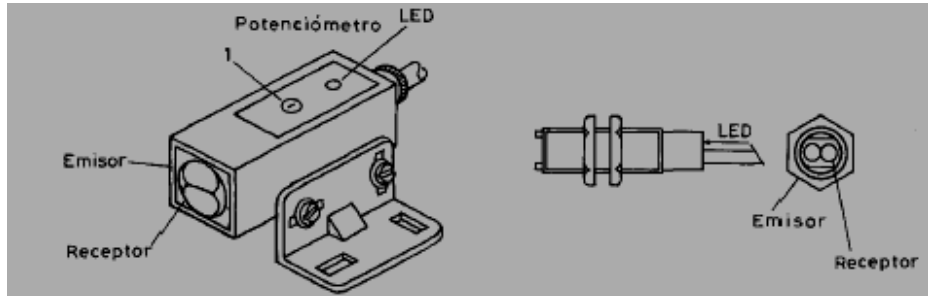
Fuente: Fuente: José Luis R, **Autómatas Programables**, (Editorial: Alfa y Omega, México 1998), pág., 118.

### **2.7.1.3 Detectores ópticos**

Los detectores ópticos emplean fotocélulas como elementos de detección. Algunos tipos disponen de un cabezal que incorpora un emisor de luz y la fotocélula de detección, actuando como reflexión y detección del haz de luz reflejado sobre el objeto que se pretende detectar. Otros tipos trabajan en forma de barrera están provistos para detección de mayores distancias con fuentes luminosas independientes del cabezal detector.

Unas de sus principales características son elevado inmunidad a perturbaciones electromagnéticas externas, distancias de detección grandes respecto a inductivos o capacitivos, alta velocidad de respuesta a frecuencia de conmutación, identificación de colores, capaces de detectar objetos del tamaño de décimas de milímetro.

**Figura 22. Sensor óptico**



Fuente: Fuente: José Luis R, **Autómatas Programables**, (Editorial: Alfa y Omega, México 1998), pág., 119.

#### **2.7.1.4. Detectores ultrasónicos**

Estos se encuentran basados en la emisión-recepción de ondas ultrasónicas. Cuando un objeto interrumpe el haz, el nivel de recepción varía y el receptor lo detecta.

Como ventaja frente a los ópticos, los detectores ultrasónicos pueden detectar con facilidad objetos transparentes, como cristal y plásticos, materiales que ofrecen dificultad a los detectores ópticos.

#### **2.7.2 Medidores de posición o distancia**

Dentro de los traductores de posición podemos distinguir dos grandes grupos:

- Los indicadores de posición lineal o angular para grandes distancia conocidos también como sistemas de medición de coordenadas
- Los detectores de pequeñas deformaciones o detectores de presencia de objetos a una cierta distancia que dan una señal analógica o digital proporcional a dicha distancia.

Los medidores de coordenadas se utilizan, por lo general, para determinar la posición relativa de las partes móviles de una maquina. Se trata de transductores de desplazamiento relativo provistos para medición indirecta de distancia y se dice medición indirecta por cuando en realidad no permiten determinar distancias entre objetos estáticos, sino únicamente la posición relativa de objetos a partir de un origen o desplazamiento. Se pueden distinguir generalmente dos grupos absolutos e incrementales.

Los primeros dan en todo momento una indicación de posición respecto a un origen, incluso en caso de perdida de alimentación. Los incrementales es cambio detectan desplazamientos y obtienen la posición final a base de acumular dichos desplazamientos respecto con el origen, en consecuencia estos cuando pierden la alimentación puede perder la referencia al origen.

### **2.7.3. Detectores de temperatura**

La temperatura es otro parámetro que muchas veces se debe controlar en los procesos industriales. Generalmente se distinguen tres grandes grupos de sensores térmicos:

- Termostato todo o nada: interruptores que conmutan a un cierto valor de temperatura, en general con una cierta histéresis.
- Termoresistencias: sensores pasivos del tipo analógico basados en el cambio de resistividad eléctrica de algunos metales o semiconductores con la temperatura.
- Pirómetros de radiación: Sensores del tipo analógico, utilizables en general para altas temperaturas, que están basados en la radiación térmica emitida por los cuerpos calientes.

### **2.7.3.1 Termostatos**

Los termostatos son sensores con salida del tipo todo o nada que conmutan a cierto valor de la temperatura. Los más simples están basados generalmente en la diferencia de dilatación de dos materiales.

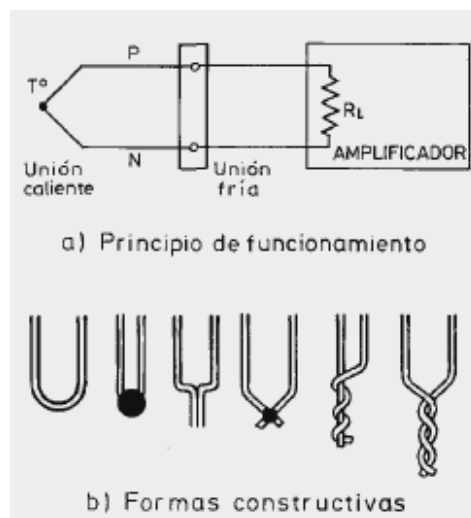
Los del tipo bimetálico se utilizan típicamente en sistemas de climatización y en algunas aplicaciones industriales como interruptores de protección.

### **2.7.3.2. Termocoplas**

Los termocoplas son sensores activos del tipo analógico basados en el efecto Seebeck.

Dicho efecto consiste en la aparición de una tensión eléctrica entre dos piezas de distintos materiales unidos o soldadas por un extremo, cuando este se calienta y los dos extremos a una misma temperatura inferior se producen una diferencia de potencial.

**Figura 23. Termocoplas**



Fuente: Fuente: José Luis R, **Autómatas Programables**, (Editorial: Alfa y Omega, México 1998), pág., 131

En la tabla I se indica algunas de las uniones de metales y aleaciones más utilizadas en la construcción de los termopares, así como sus principales características.



**Tabla I. Características de distintas termocoplas**

Materiales	Tipo	Constante termoelectrica	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 – 1000°C	Robustez
PtRh-Pt	R	0,012 mV/°C	0 – 1600°C	Estabilidad
NiCr-Const.	E	0,075 mV/°C	0 – 600°C	Sensibilidad

Fuente: Fuente: José Luis R, **Autómatas Programables**, pág., 131

### **2.7.3.3 Termoresistencias Pt 100**

Los conductores eléctricos presentan, en general, un aumento de resistencia con la temperatura; aprovechado esta propiedad se construyen sondas de temperatura, pero para ello se requiere un material cuyo coeficiente se mantenga relativamente constante y de una buena sensibilidad. Las sondas industriales se suelen construir a base de platino, material cuyo coeficiente térmico es de 0.00385 ohm/ohm °C. Dichas sondas suelen tener un valor nominal de 100 ohm a 0° C de donde se deriva el nombre de Pt 100.

Las Pt 100 son aptas como sensores para un amplio rango de temperaturas que va desde -250° C hasta 850° C son una buena linealidad.

### **2.7.3.4 Termoresistencia PTC NTC**

Las sondas PTC y NTC son esencialmente termoresistencias a base de semiconductores.

Estos suelen presentar coeficientes de sensibilidad bastante mayores que en el caso de metales, pero a costa de una gran pérdida de linealidad.

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 cierta temperatura. Debido a su comportamiento poco lineal, se aplican básicamente en combinación de circuitos detectores de umbral con elementos todo o nada.

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

#### **2.7.4 Medidores de presión**

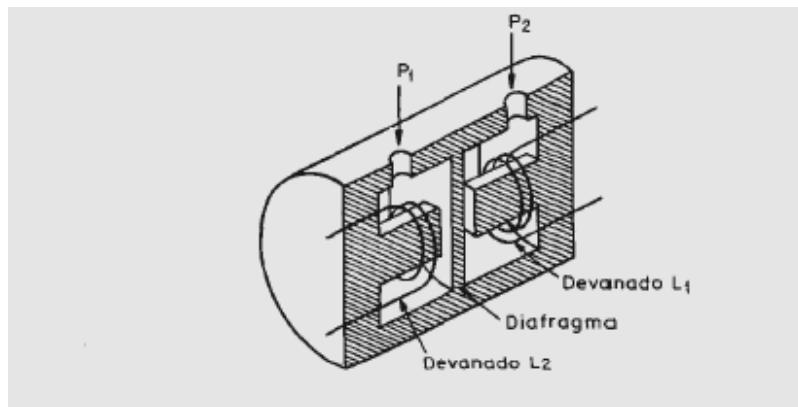
Los medidores de presión suelen estar basados en la deformación de un elemento elástico (membrana, tubo de Bourdon, etc.), cuyo movimiento bajo la acción de un fluido es detectado por un traductor de pequeños desplazamientos (galgas, transformador diferencial, elemento piezoeléctrico, etc.), del que se obtiene la señal eléctrica proporcional a la presión.

Los traductores 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.

Si se mide dicha deformación mediante un puente de galgas extensiométricos, o transformador diferencial, se obtiene una medida indirecta de la presión. Los traductores de presión pueden efectuar dos tipos de medidas:

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

**Figura 24. Sensor de presión diferencial**



Fuente: Fuente: José Luis R, **Autómatas Programables**, (Editorial: Alfa y Omega, México 1998), pág., 133

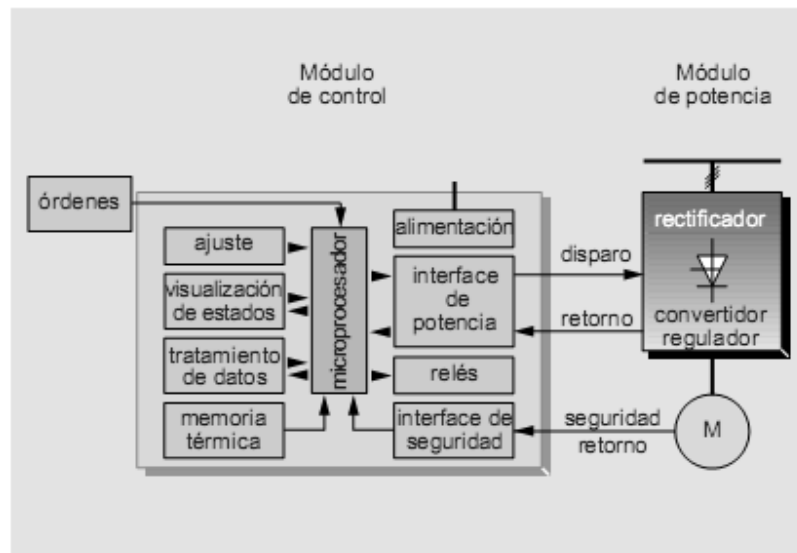
### 3. EL VARIADOR DE FRECUENCIA

#### 3.1 Descripción y características generales

##### 3.1.1. Funcionamiento básico

La mayor parte de variadores de frecuencia de estado sólido empleados para controlar motores de inducción estándar, producen frecuencia y voltaje variables para controlarlos, la figura 25 muestra un diagrama de bloques elemental de un variador de frecuencia.

Figura 25. Diagrama de bloques de variador de frecuencia



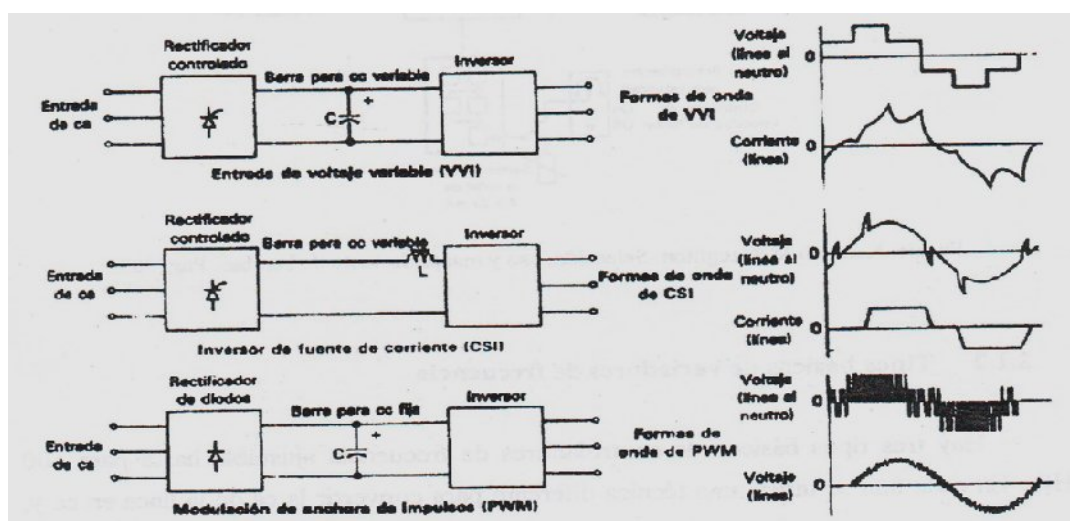
Fuente: Kenneth McNaughton, Selección, y uso de bombas, pág. 330.

### 3.1.2 Tipo básico de variadores de frecuencia

Hay tres tipos básicos de controladores de frecuencia ajustable hasta para 500 HP: en cada uno se utiliza una técnica diferente para convertir la ca de la línea en cc y luego variar la cc para que se mas o menos igual que la ca. Cada uno tiene sus ventajas.

En la unidad motriz con inversor de entrada de voltaje variable (VVVI), figura 26 se utiliza un rectificador controlado o rectificador con diodos y modulador en unidades analógicas, mejor conocido como chopper (no se ilustra), para transformar el voltaje de entrada de ca en cc de voltaje variable. La frecuencia de la salida se controla con la conmutación en secuencia de los transistores o los tiristores en el inversor, en seis pasos discretos para producir la salida con la forma de onda ilustrada. La corriente sigue al voltaje en una onda más o menos senoidal.

Figura 26. Diferentes configuraciones de variador de frecuencia



Fuente: Kenneth McNaughton, Selección, y uso de bombas, pág. 305.

El controlador de VVI es el sistema regulador mas sencillo entre los tres tipos de unidades motrices con frecuencia variable, aunque incluye la máxima cantidad de componentes de filtro de cc, que consisten en un inductor de cc y capacitares (condensadores) de filtro que filtran el voltaje de entrada al inversor y almacenan energía para su uso temporal.

En la unidad motriz con inversor de entrada de la fuente de corriente (Current Source-Input, CSI), figura 26 se utiliza también un rectificador controlado, o rectificador con diodos y chopper para convertir la ca en cc de potencial variable. La corriente detectada en los transformadores en la línea de ca es la base para variar el rectificador controlado. La sección del inversor produce corriente de frecuencia variable en seis pasos y el voltaje sigue a la corriente, con crestas de conmutación debidas al disparo de los tiristores como se muestra en la figura.

La ventaja principal de la unidad motriz con CSI es que puede producir control completo de la corriente del motor con lo que se tiene control completo del par. Sin embargo, esta característica de control de corriente necesita un inductor del filtro grande y un regulador semicomplejo, por la dificultad de controlar el motor solo con la corriente.

En la unidad motriz con inverso de modulación de anchura de impulsor (Pulse-Width-Modulated, PWD) se utiliza un rectificador de diodos para producir un voltaje constante de cc. Por ello el inversor controla el voltaje y la frecuencia. Para ello se varía la anchura y la frecuencia de los impulsos de salida de modo que el voltaje eficaz sea más o menos senoidal.

Debido a que el controlado de PWN le presta al motor una simulación muy aproximada de la potencia de onda senoidal, se requieren pocos componentes. Sin embargo, las complejas formas de onda para conmutación en el inversor requieren el empleo del regulador de máxima complejidad en las unidades motrices descritas y las pérdidas por conmutación pueden ser elevadas.

Cada tipo de unidad motriz tiene ventajas específicas:

- A velocidad máxima y con plena carga, la eficiencia de la unidad motriz es más crítica por la gran cantidad de potencia que debe manejar. No obstante, los tres tipos de unidades motrices de frecuencia ajustable tienen eficiencia bastante aproximada, del 85 al 90% incluso el controlador y el motor.
- Las eficiencias de los tres tipos de unidades motrices pueden variar según el caballaje nominal y las condiciones de funcionamiento. Las unidades par alto caballaje tienen mayor eficiencia además de que funcionan más cerca de su capacidad nominal máxima de diseño.
- Las pérdidas en el motor están en función de la corriente de carga, que es la misma, sin que importe el tipo de unidad.
- El controlador de CSI conserva mayor eficiencia que los otros cuando se reduce la velocidad. Las pérdidas por conmutación, que se relacionan con la conmutación o apagado de los tiristores en el inversor y que son un importante factor en las pérdidas totales en el controlador, varían en proporción con el par y la corriente.

## **3.2. Características principales de los convertidores de frecuencia**

A continuación se tratara de enumerar las características más importantes. Su aplicaron es para todos los convertidores de frecuencia.

### **3.2.1. Alimentación al variador de frecuencia**

Las características que define la alimentación son:

- Red e alimentación monofásica o trifásica
- Tensión de alimentación
- Tolerancia en la tensión de alimentación respecto del valor nominal
- Frecuencia de alimenticio. Normalmente 50 ó 60 HZ. Según sea el país
- Tolerancia en las frecuencia de entrada
- Transformador de conexión en el caso de que sea necesario: en este caso los datos aportar serian:
  - - Potencia aparente
    - Número de secundarios
    - Relación de transformación
    - Grupo de conexiones
    - Tensión de cortocircuito
    - Tipo constructivo



### **3.2.2. Características nominales de salida del variador**

- Potencia del mayor motor que puede ser accionado por el variador. Normalmente este dato se refiere a motores en su versión de 4 polos. Si la polaridad del otro a emplear fuere diferente, se tendrá en cuenta la intensidad nominal y la del arranque del motor de distinta polaridad.
- Intensidad nominal de régimen continuo.
- Máxima tensión de salida.
- Potencia aparente nominal del inversor. Esta relacionado con las dos características anteriores
- Frecuencia de salida. Se presenta, con un valor mínimo y con otro máximo, en forma de banda de operación.
- Capacidad de sobrecarga durante un tiempo determinado.

### **3.2.3. Características de control de convertidor de frecuencia**

- Indicador si el control necesita sensores de velocidad y de posición o si no los precisa
- Método de control de la velocidad y de la posición
- Método de control del par.
- Resolución en la frecuencia de salida
- Tiempos de rampa para aceleración y desaceleración. Estos tiempos se han de poder ajustar separadamente
- Posibilidad de “tomar al vuelo” al motor en cualquier velocidad, sin transitorios eléctricos ni mecánicos.
- Ajuste de posibilidad de curvas v-f (tensión frecuencia)

- Microprocesador de control empleado.
- Comunicación con ordenadores o autómatas programables. Designación del “bus” con el que es compatible.

#### **3.2.4. Características globales del convertidor de frecuencia**

- Rendimiento o pérdidas. Es deseable se faciliten para diversas cargas.
- Factor de potencia en la toma de la red de alimentación. Téngase en cuenta el mejor valor que se da en los rectificadores con semiconductor no controlado (diodo).
- Posibilidad de funcionamiento recuperativo. Funcionamiento en 1, 2 ó 4 cuadrantes.
- Normas con las que esta fabricado y ensayado.

#### **3.2.5. Características ambientales**

- Banda de temperatura para la que mantiene la potencia nominal
- Desclasificación para temperaturas superiores a las de la banda anterior.
- Máxima altitud a la que se puede instalar.
- Desclasificación para funcionamiento en altitudes superiores.
- Grado de humedad máximo para el que puede funcionar.
- Condiciones extremas de temperatura de almacenamiento.
- Máximo nivel de vibraciones que puede admitir.
- Ruido audible radiado.
- Radiación electromagnética que produce y normas que cumple.

### **3.2.6. Protecciones que lleva incorporado el variador de frecuencia**

Se indicara las que proporcionan el fabricante generalmente, entre las más notable se tiene:

- Sobrecarga del motor.
- Sobre intensidad instantánea.
- Fallo de fusible.
- Sobretensión en la red.
- Mínima tensión de la red.
- Fallo momentáneo en la alimentación
- Fallo momentáneo en la carga accionada.
- Prevención de bloqueo del motor.
- Fallo a tierra.
- Sobrecalentamiento del radiador de los semiconductores de potencia.

### **3.2.7 Especificaciones de frenado**

En los casos en lo que el inversor de frecuencia no funcione en recuperación energética, y el frenado sea disipativo, serán especificados con los siguientes extremos:

- Elemento disipador de energía, que será normalmente una resistencia.
- Valor de la resistencia y capacidad térmica en régimen de corta duración.
- Método para control de la resistencia.
- Pares de frenado que se puedan obtener y tiempo de aplicación de los mismos.

### **3.3. Componentes de la parte de potencia de los variadores de frecuencia.**

#### **3.3.1. Terminología y definiciones de los variadores de frecuencia**

Designamos como rectificadores a los circuitos electrónicos que convierten la potencia tomada de una red industrial de tensión alterna, prácticamente constante, transformándola en potencia sobre una red de tensión continua. Dentro de los rectificadores encontramos dos clases:

- Rectificadores no controlados. Suministran una tensión continua de salida prácticamente constante.
- Rectificadores controlados. Este tipo es posible obtener una tensión de salida, en lado de cc regulada.

Denominamos reguladores de tensión continua aquellos dispositivos que partiendo de una red de tensión continua constante dan potencia sobre otra red de tensión continua regulable. Estos reguladores reciben muy comúnmente el nombre inglés de chopper el cual se traduce como troceador o recortador.

Los dispositivos convertidores que obtiene potencia en tensión alterna y además con frecuencia variable a partir de un sistema de potencia en tensión continua reciben el nombre de onduladores

A la asociación de rectificador y ondulator se le da el nombre de inversor o de variador de frecuencia con esta asociación se puede obtener potencia con tensión y frecuencia variables, y es el dispositivo mas empleado actualmente para control de velocidad y par en accionamientos eléctricos con motores de corriente alterna.

Hay un tipo de variador de frecuencia que no precisa del paso intermedio por corriente continua. A este aparato se le conoce como cicloconvertidor, o como convertidor directo, en función de comportamiento durante la conmutación distinguiremos los siguientes tipos:

- Rectificadores de conmutación forzada. Es el caso en el cual la tensión que hace que los semiconductores pasen al estado de bloqueo es externa al rectificador. Existen dos posibilidades
  - Conmutación forzada por la red. Es decir, cuando esta tensión es de la red de alimentación ca.
  - Conmutación forzada por la carga. Para el caso de que la carga, de tipo activo, proporciona esta tensión. Estamos, en el caso de alimentación de un motor síncrono
  
- Rectificadores auto conmutados o de conmutación propio. Ahora la tensión de conmutación la proporciona el propio rectificador generalmente mediante descarga de condensadores, previamente cargados.

### 3.3.2. Semiconductores para convertidores de frecuencia

El diseño y funcionamiento de los variadores de frecuencia, requiere el empleo de semiconductores de potencia. De un modo ideal estos semiconductores funcionan como interruptores y por tanto tienen dos posiciones definidas:

- Posición de bloque o de corte. El semiconductor no permite el paso de intensidad.
- Posición de conducción o de saturación. El semiconductor permite el paso de intensidad, y la caída de tensión que produce es nula en el caso ideal.

En un interruptor ideal serian deseables las siguientes características:

- Baja intensidad de fugas en estado de bloqueo
- Alto bloqueo de tensión.
- Alta intensidad nominal.
- Baja caída de tensión en estado de conducción.
- Proporcionalidad directa entre la caída de tensión y la intensidad.
- Cortos tiempos de conexión y desconexión.
- Bajas tensiones e intensidades de control, es decir, potencia de control reducida.

Lo que generalmente en la práctica no sucede ya que el comportamiento no es ideal; las características que servirán para evaluar a los distintos semiconductores, son los siguientes:

- Tensión de utilización.
- Intensidad nominal de empleo.
- Tiempo de conmutación desde bloqueo a saturación.
- Tiempo de conmutación en condición de corte.
- Corrientes de fugas mientras permanece en estado de bloqueo.
- Caída de tensión durante la conducción.
- Control de pequeña potencia (tensión o intensidad).

Los semiconductores utilizados para realizar las operaciones anteriores son los siguientes:

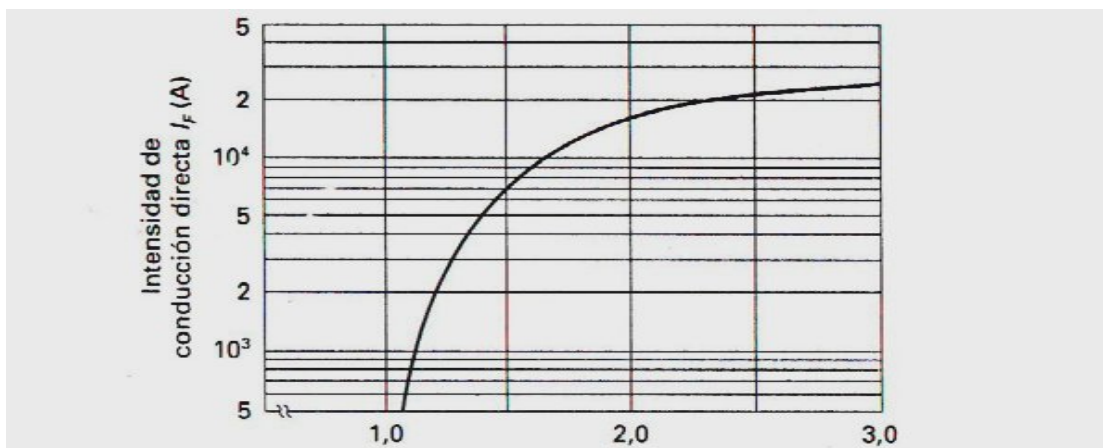
- Diodo o rectificador
- Rectificador controlado de silicio SCR o tiristor
- Tiristor desconectable por compuerta GTO
- Transistor de potencia
- Transistor Bipolar de puerta aislada IGBT:
- Transistor de efecto de campo de oxido metálico silicio MOSFET:

### 3.3.2.1. El diodo

El diodo es un semiconductor diseñado para conducir corriente en una sola dirección. En la figura siguiente aparece el símbolo de este dispositivo. Esta diseñado para conducir corriente desde su ánodo hasta su cátodo, pero no en dirección opuesta.

Además en la figura 27 se muestra la característica de voltaje-corriente del diodo en la dirección conductora, resulta un gran flujo de corriente. Cuando se aplica un voltaje al diodo en la dirección inversa, el flujo de corriente queda limitado a un valor muy pequeño (de orden de microamperios o menos). Si se aplica al diodo un voltaje suficientemente grande en sentido inverso, se romperá y permitirá el flujo de corriente en dirección inversa.

Figura 27. Grafica de conducción del diodo



Fuente: José Maria Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 68



Los diodos están dimensionados para una cantidad de potencia que puedan disipar con seguridad y para un voltaje inverso máximo que pueden soportar antes de romperse. La potencia que disipa un diodo durante su operación en dirección conductora es igual a la caída de voltaje en el diodo multiplicada por la corriente que fluye en este. Esta potencia debe ser limitada para proteger el diodo del sobrecalentamiento.

Los diodos también se dimensionan por el tiempo de conmutación, tiempo que toman en pasar del estado de apagado al de encendido, y viceversa. Debido a que los diodos de potencia son grandes, los elementos de alta potencia con una gran cantidad de carga almacenado en sus juntas, conmutan su estado mucho más lentamente que los diodos utilizados en los circuitos electrónicos. En esencia, todos los diodos de potencia pueden cambiar su estado con gran rapidez para utilizarlos como rectificadores en circuitos de 50 y 60 Hz. Sin embargo, algunas aplicaciones con modulación de ancho de pulso (PWN) pueden requerir diodos de potencia que conmuten de estado a tasas mayores de 10,000 Hz. En estas aplicaciones de muy rápida conmutación, se utilizan diodos especiales llamados diodos de alta velocidad de recuperación.

### **3.2.2.2. Rectificador controlado de silicio SCR o tiristor**

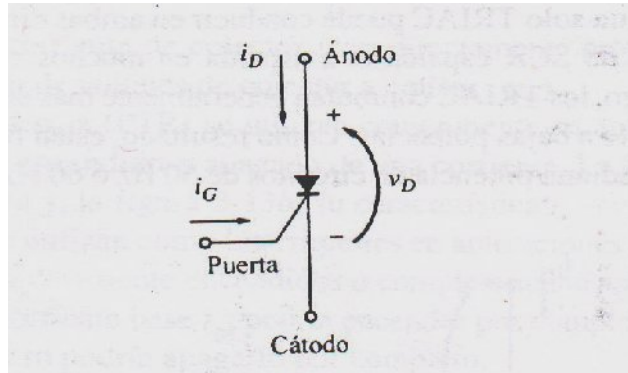
El SCR es muy útil en aplicaciones de control de motores porque su tensión de transición conductiva, o de voltaje de encendido, puede ajustarse mediante la corriente que fluye en su terminal de puerta.

Cuando mayor sea la corriente de puerta, menor llega a ser el voltaje  $V_{bo}$ . Si se escoge un SCR tal que su tensión de transición conductiva sin señal de puerta es mayor que el voltaje mayor del circuito, solo puede ser encendido por la aplicación de una corriente de puerta. Una vez encendida, permanece así hasta que su corriente cae por debajo de  $I_h$ . De esta manera, una vez activado el SCR, su corriente de puerta puede quitarse sin afectar su estado. En el estado de encendido, la caída de tensión directa a través del SCR es alrededor de 1.2 a 1.5 veces mayor que la caída de tensión a través de un diodo común polarizado directamente.

Los tiristores de tres hilos o SCR son en definitiva los elementos más utilizados en los circuitos de control de potencia pues se utilizan en aplicaciones de conmutación o rectificación y se encuentran disponibles en valores nominales desde unos pocos amperios hasta una máxima de casi 3000 A. En resumen, un SCR

1. Se enciende cuando el voltaje  $V_d$  que se le aplica excede a  $V_{bo}$ .
2. Tiene un voltaje de transición  $V_{bo}$  cuyo nivel es controlado por la cantidad de corriente de puerta  $I_g$  presente en el SCR:
3. Se apaga cuando la corriente  $I_d$  que fluye a través de él cae debajo de  $I_h$ .
4. Bloquea todo flujo de corriente en dirección inversa hasta que se excede el voltaje inverso.

**Figura 28. SCR o tiristor**



Fuente: José María Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 72

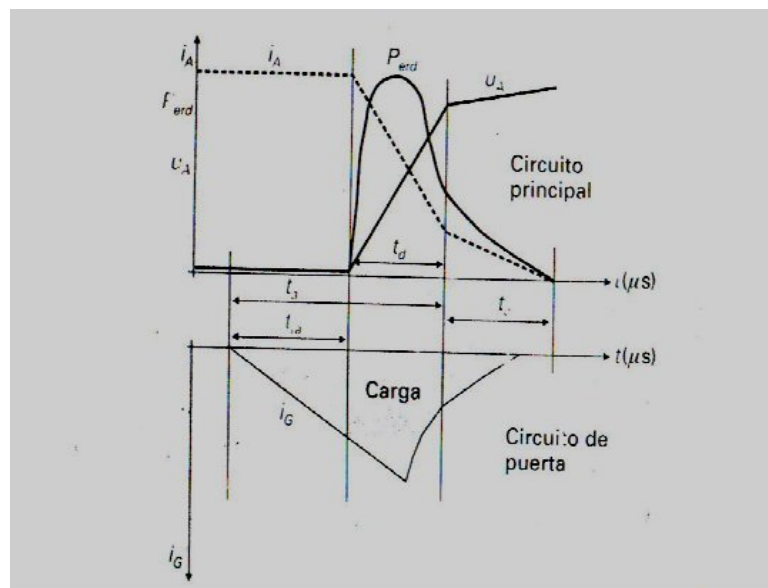
### **3.2.2.3. Tiristor de interrupción por puerta**

Entre los logros más recientes en tiristores, se encuentra el tiristor de interrupción por puerta (GTO). Un tiristor GTO es un SCR que se puede apagar por un impulso suficiente negativo en su terminal de puerta, aun cuando la corriente  $I_D$  exceda a  $I_H$ . Estos dispositivos han llegado a ser más y más comunes en los paquetes de control de motores porque eliminan la necesidad de componentes externos para su apagado de los SCR en los circuitos dc. El símbolo de un GTO se muestra en la figura siguiente.

La figura 29 muestra la onda típica de corriente de puerta para un tiristor GTO de alta potencia. Un tiristor GTO requiere una corriente de encendido mayor que la de un SCR. Para dispositivos de alta potencia, se requieren corrientes de puerta de 10 A. o más. Para apagar el equipo, se requiere un pulso negativo grande de 20 30 microsegundos.

La magnitud del pulso de corriente negativa debe ser un cuarto o un sexto de la corriente que fluye a través del dispositivo.

**Figura 29. Onda de corriente para GTO**



Fuente: José María Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 77

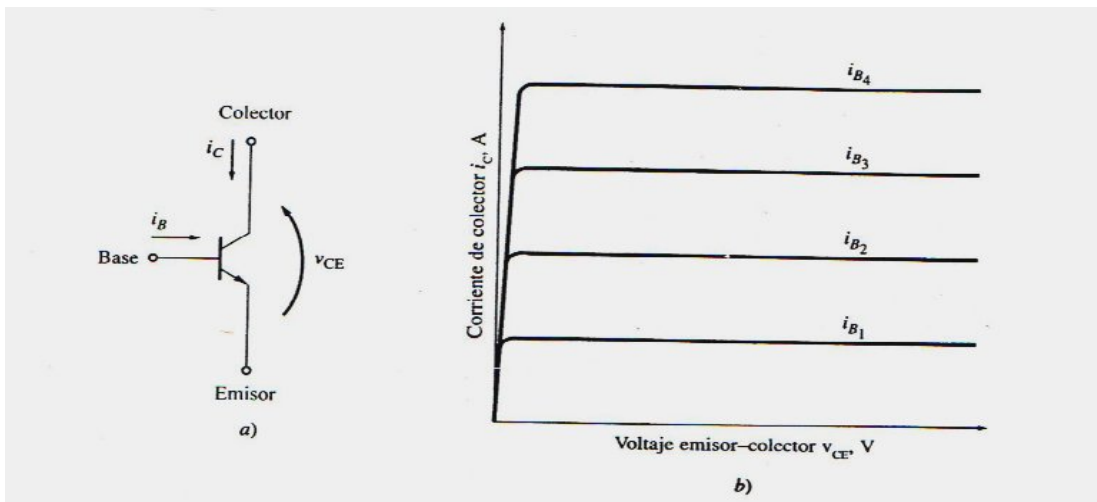
### 3.2.2.4. Transistor de potencia

Como se observa en la figura siguiente el transistor es un dispositivo cuya corriente de colector  $I_c$  es directamente proporcional a su corriente base  $I_b$  para un amplio rango de voltajes de colector a emisor ( $V_{ce}$ ).

Los transistores de potencia (PTR), se utilizan comúnmente en aplicaciones de control de maquinas para conmutar el encendido o apagado de una corriente. Los transistores se utilizan como interruptores en aplicaciones de control de maquinas; como tales, deben estar completamente encendidos completamente apagados. Como se muestra en la figura siguiente una corriente de base  $I_{B4}$  podría encender por completo el transistor mientras que una corriente base de cero podría apagarlo por completo.

Los transistores de potencia se utilizan con más frecuencia en circuitos inversores. Su mayor desventaja en aplicaciones de conmutación es que los transistores de gran potencia son relativamente lentos para cambiar de estado de encendido al de apagado, y viceversa, ya que se deben aplicar o remover una corriente base relativamente grande cuando ellos se encienden o se apagan.

**Figura 30. Curva de operación de transistor de potencia**



Fuente: José María Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 81

### **3.2.2.5. Transistor bipolar de puerta aislada (IGBT)**

El desarrollo del transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) es bastante reciente. Es similar al transistor de potencia, excepto que es controlado por un voltaje aplicado a la puerta en lugar de la corriente que fluye en la base del transistor de potencia. La impedancia de la puerta de control es muy alta en un IGBT, de modo que la cantidad de corriente que fluye en ella es un extremo pequeña. El dispositivo es básicamente equivalente a la combinación de un transistor semiconductor metal-óxido de efecto de campo (MOSFET) y un transistor de potencia.

Puesto que el IGBT es controlado por un voltaje de puerta con un flujo de corriente muy pequeño, puede conmutar con mucha más rapidez que el transistor de potencia convencional. Los IGBT se utilizan en aplicaciones de alta potencia y frecuencia.

### **3.4. Inversores con circuito intermedio**

Se denomina inversores, a los convertidores de frecuencia que modifican la frecuencia y tensión de entrada fija, en frecuencia y tensión de salida variables para acomodarse a las que necesita en cada momento el motor de accionamiento.

### 3.4.1. Clasificación y generalidades

Se tiene una definición del término con circuito intermedio, las cuales se encuentran formados por dos etapas las cuales se encuentran en serie.

- Rectificados, que transforma las magnitudes fijas de la red de ca en tensión o intensidad continuas. La potencia en cc aparece en el llamado circuito intermedio.
- Ondulador, que modifica la potencia en cc en magnitudes ca regulables en lado del motor.

Rectificados, circuito intermedio de cc y ondulator están en serie y el conjunto de los tres constituye un inversor. Por su empleo los inversores se clasifican en los siguientes grupos:

- Inversores que alimentan al bobinado de estator de motores asíncronos de cortocircuito, y síncronos.
- Inversores montados en el bobinado el rotor de los motores de anillos constituyen las llamadas cascadas.

En la figura siguiente se observa la clasificación de inversores para alimentar al estator de los motores de corriente alterna, en ellas se recoge las conexiones básicas de las etapas rectificadores y ondulatoria, así como el tipo de circuito intermedio de cc empleado, que en unos casos es de tensión y en otros de intensidad.

La etapa central es el denominado circuito intermedio de continua, y según la disposición que se adopte funciona en fuente de tensión o de intensidad para la etapa final u ondulatora. En ocasiones al ondulator se le denomina inversor que es el nombre para todo conjunto del convertidor de frecuencia.

Cuando el circuito intermedio funciona como fuente de intensidad para el ondulator, se pone un condensador electroestático entre sus terminales /+ ) (-), su función es mantener el valor de la tensión, estamos ante un inversor con circuito intermedio de tensión.

Cuando el circuito intermedio funciona como fuente de intensidad para el ondulator, se coloca una inductancia en serie con una de su rama, su función es mantener el valor de la intensidad, tenemos un inversor con circuito intermedio de corriente.



Figura 31. Clasificación de inversores para motores de c.a

Circuito intermedio	De tensión continua ajustable			De tensión continua fija		De intensidad
Tipo de inversor	Inversor con salida en bloques			Inversor con salida en pulsos		Salida en bloques
Frenado recupera	NO	NO	SI	NO	SI	SI
Conexión						
Tensión de línea dc salida						
Intensidad de salida						
Tipo de motor	Asíncrono de serie potencia reducida, sincronicos, reluctancia			Asíncrono de serie		Asíncrono con reactancia baja
Accionamiento de	Uno o varios motores			Uno o varios motores		Un motor
Regulación velocidad	1 : 20			1 : 1000		1 : 10
Frecuencia máxima	400 Hz			400 Hz		250 Hz

Fuente: José Maria Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 92

En la figura 31 los primero inversores que aparecen, cada alternancia de la tensión de salida esta formada por bloques de duración temporal.

La frecuencia de estos bloques da la de salida, y la tensión de salida se regula mediante la magnitud de la tensión en el circuito intermedio. Estos tres inversores son con circuito intermedio de tensión continua. La regulación de tensión estará dada por el:

- rectificador controlado de entrada
- rectificador no controlado de entrada, con un chooper en el circuito intermedio.

La primera de las configuraciones permite un funcionamiento en dos cuadrantes, pero la segunda solo puede realizarlo en uno. Se deseamos un convertidor de frecuencia para los cuatro cuadrantes tendremos que adoptar la configuración de la tercera columna con un puente rectificador doble anti paralelo.

De las tres configuraciones la de la segunda columna, es la de menor consumo de reactiva.

La etapa onduladora esta formada siempre por un puente funcionando como inversor, el cual ha de estar formado por semiconductores controlables. En los inversores de tecnologías maduras estos eran siempre tiristores. Al menos que el motor accionado, se asíncrono, estos inversores han de tener conmutación propia ya que no disponen de red que suministre la f.e.m. para su conmutación. Entre las configuraciones estudiadas en cada semiciclo se producen conmutaciones alternas de la tensión continua disponible en el circuito intermedio sobre las tres fases de salida, obteniéndose un sistema trifásico de ondas de tensión cuadradas.

Los inversores de este tipo al alimentar el motor de ca hacen que la intensidad absorbida que ya es cuadrada, se aleje mucho todavía de la senoidal (presenta armónicos) por lo que el motor no funcionara adecuadamente debido a efectos tales como:

- Mayores pérdidas de Joule y parasitas
- Par motor que presenta componentes pulsatorias adicionales.
- Ruido y vibraciones.

Se puede tener un rectificador no controlado en la entrada, con sus ventajas inherentes de bajo consumo de reactiva y de menor coste. Sin embargo no puede funcionar más que en un solo cuadrante. Para lograr el funcionamiento en los cuatro es preciso poner, en anti paralelo con el rectificador no controlado, un rectificador controlado, esto se observa en la columna 5 de la figura 31. Este rectificador ha de llevar un transformador para acomodar las tensiones ya que debido al fenómeno e ángulo máximo en inversor, los rectificadores no podrían acoplarse. Estos inversores, acabados de presentar, son más complejos ya que:

- El sistema de control ha de realiza tareas mas laboriosas y frecuentes para dar ordenes de apagado y encendido varias veces por cada semionda de frecuencia fundamental.
- Provisiones para la conmutación rápida. Esto significa que son precisos:
  - Tiristores con dispositivos de conmutación.
  - Semiconductores de mas sencilla conmutación y que admiten altas frecuencias, tales como transistor de potencia, GTO, IGBT.

Todo lo anteriormente mencionado se utiliza para motores asíncronos de cortocircuito y en particular para los de fabricación en serie. Para los motores síncronos las cosas se facilitan ya que el motor, al disponer de excitación, funciona como una fuente autónoma de f.e.m. que ayuda los tiristores a conmutar. Los accionamientos de motor síncrono son de potencia alta o muy alta, y en consecuencia el empleo de los tiristores es necesario. Los inversores empleados son de los de tensión de salida en bloque. El motor síncrono tiene mucho más entrehierro que el asíncrono, y aunque se alimente con ondas de tensión cuadradas (altos armónicos de tensión) actúa como un buen filtro por lo que la onda de corriente absorbida tiene muchos menos armónicos, esto se conoce como inversor intermedio de intensidad.

### **3.4.2. Funcionamiento de un inversor**

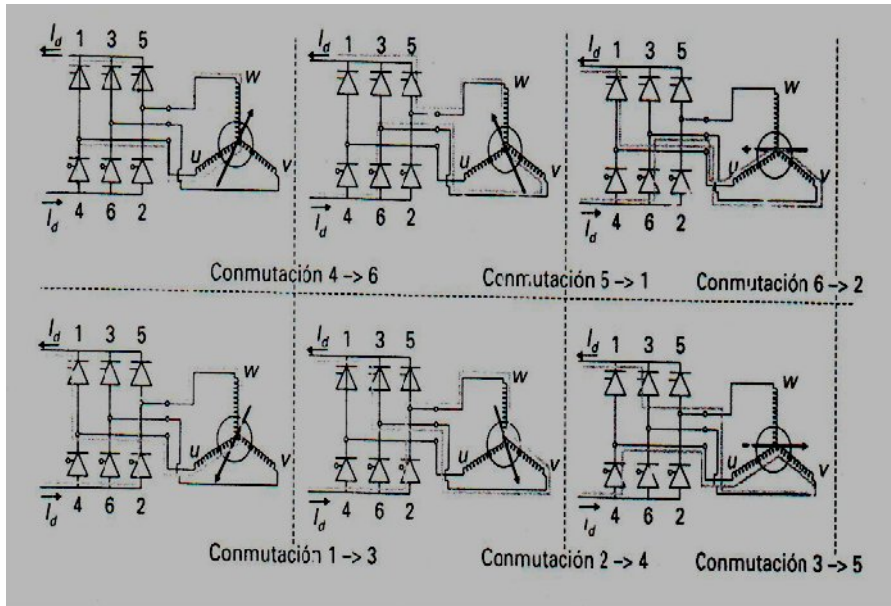
Se menciono anteriormente que hay tres etapas en un inversor. A continuación se detallara la última etapa la cual es la de ondulación de una forma sencilla. Hemos de decir ante todo que el ondulator es un conmutador electrónico que comunica alternativamente la tensión o intensidad continuas del circuito sobre las fases del motor de ca conectada en su salida. La disposición más común es un puente trifásico de Graetz y esta formada por semiconductores controlables que pueden ser tiristores, GTO, transistores de potencia o IGBT.

En función de la mayor o menor perfección del sistema de conmutación empleado, lograremos que las ondas de tensión en su salida hagan que las corrientes absorbidas se acerquen mas o menos al sistema trifásico senoidal.

La conmutación del ondulator ya no esta realizada por la red, salvo en el caso que el motor sea síncrono, pues los motores asíncronos constituyen cargas pasivas que no proporcionan tensiones de conmutación. En estos casos han de tener conmutación propia, es decir, serán autoconmutados. Esto hace que si los semiconductores son tiristores, hagan falta circuitos auxiliares complejos para que la corriente en cada tiristor se extinga, lo cual es una condición previa para su apagado.

En la figura siguiente podremos observar su funcionamiento, supongamos que la conmutación es ideal, representada con tiristores, tampoco nos preocupamos por la onda de corriente que en este caso es cuadrada. Se ven las fases y como son alimentadas sucesivamente por el ondulator. En el motor las fases se sustituyen por bobinas equivalentes concentradas sobre los ejes de cada una de ellas. El motor esta conectado en estrella y por tanto las fases van siendo energizadas de dos en dos. El favor del campo magnético de entrehierro que se genera se representa en sus posiciones sucesivas viendo pues como se produce su rotación y por tanto la del rotor del motor. Las posiciones sucesivas de conducción de los tiristores se ven en la tabla II que se muestra a continuación, se observa que el campo giratorio toma posiciones sucesivas separadas entre si  $60^\circ$ .

**Figura 32. Funcionamiento de inversor de frecuencia**



Fuente: José María Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 138

**Tabla II. Secuencia de conmutación en ondulator trifásico alimentado con intensidad**

Rama Superior	5	5	1	1	3	3
Rama Inferior	4	6	6	2	2	4

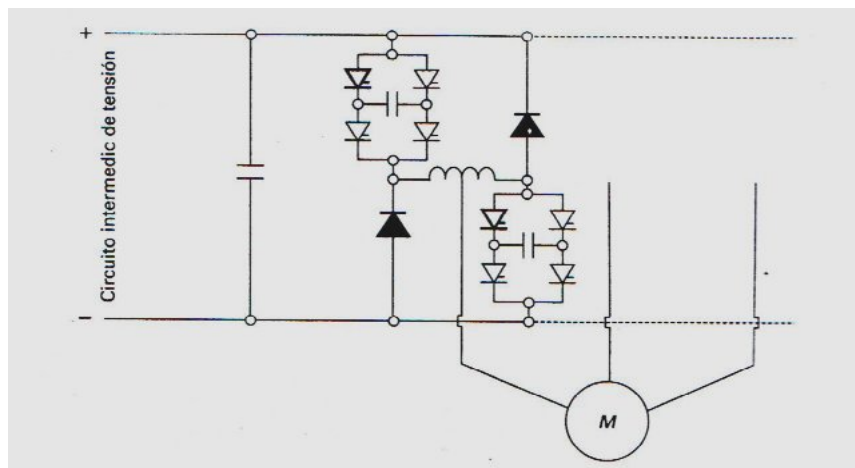
Fuente: José María Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 130

### 3.5. Inversor con circuito intermedio de tensión

Los inversores, que disponen de tiristores para su etapa de ondulación, necesitan disposiciones complicadas para lograr la conmutación.

Los que analizaremos es la denominada conmutación individual; con ella se logra la mayor flexibilidad en el control del inversor, ya que el apagado de un inversor y el encendido de otro son independientes entre si. En la figura 33 vemos el esquema de los componentes de potencia necesarios para lograr la conmutación.

**Figura 33. Conmutador de frecuencia**



Fuente: José María Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 160

En los inversores de técnica Pulse Width Modulation (PWM), en los cuales hay que conmutar al tiristor varias veces por ciclo, esta es la solución mas adecuada.

En la figura se muestra tiristores auxiliares que tiene la tares de reducir pulsos de intensidad negativos sobre el tiristor principal para forzar que su intensidad se anule. Los condensadores que aparecen junto a ellos son los que promocionan, en su descarga, la intensidad negativa.

Como además el motor es una carga inductiva para el inversor, se dispone asociado a cada tiristor principal un diodo en anti paralelo, que conducirá las intensidades en los instantes temporales en que sean opuestas a las tensiones.

### **3.6. Inversores con circuito intermedio de corriente**

Ahora la parte del ondulator va conmutando la fuente de intensidad formada por el circuito intermedio, de una forma alternativa sobre el motor de corriente alterna conectada. En caso del inversor de intensidad se dispone el circuito intermedio una inductancia que tiene doble finalidad:

- Alisar el contenido de armónicos de intensidad continua.
- Mantener su valor casi constante durante los regímenes de cambio de corriente en el inversor.

El rectificador de entrada es ahora siempre controlado y la variación en su ángulo de regulación sirve para proporcionar las distintas necesidades para el circuito intermedio y que luego se conmutan sobre la salida del inversor y se dirigen al motor.

Para lograr el frenado recuperativo en los casos de estos frenados, basta que el rectificador lado red pase a inversor cambiando el signo de su tensión, continua para ello los ángulos de retraso de incidencia cumplirán que ángulo sea mayor a  $90^\circ$ .



### **3.7. Componentes auxiliares de los Variadores de Frecuencia**

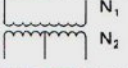

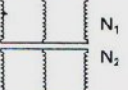

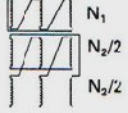

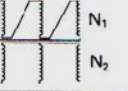

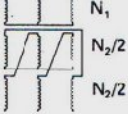

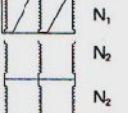

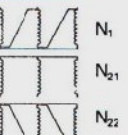

#### **3.7.1. Transformadores para variador de frecuencia**

En las aplicaciones de convertidores de media y baja potencia se han impuesto dentro de cabinas metálicas adyacentes altos convertidores. Sin embargo la potencia de los transformadores secos esta limitada generalmente a los 10/15 MVA y tensiones primarias de 36 kv. Estos transformadores se han de diseñar considerando que funcionan con intensidades no senoidales, las cuales dan perdidas adicionales en los bobinados y en el circuito magnético; otras prestaciones disponibles son:

- Simetría de tensiones.
- Igual dispersión magnética en todas las fases.
- Bajo acoplamiento entre las fases en los bobinados secundarios.

Para aumentar el número de pulsos de un rectificador de entrada y disminuir su rizado se emplean transformadores de doble secundario con desfase entre ellos de  $30^\circ$ . Para lograr esto habrá que especificar un transformador de doble secundario con grupo de conexión Dy5/d6 esta conexión se puede observar en la figura siguiente. En este tipo de transformadores los números de espiras de cada secundario son diferentes y están en la relación  $1/\sqrt{3}$ .

Figura 34. Conexiones para transformadores de variadores de frecuencia

Conexión	Designación	De fase	Orientación	Fases	Str = $k \cdot U_{do} \cdot I_d$	Puente	Rel-trans
				2	1,35	1,11	$N_1/N_2$ $N_1/2N_2$
	Yy0	0°		3	NO	1,05	$N_1/N_2$
	Dz0	0°		3	1,46	1,13	$2N_1/3N_2$
	Dy5	150°		3	1,35	1,05	$N_1/\sqrt{3}N_2$
	Yz5	150°		3	1,46		$2N_1/\sqrt{3}N_2$
	Dy5 /y11	150° 330°		6	1,55		$N_1/\sqrt{3}N_2$
	Dy5 /d6	150° 180°		6		1,05	$N_1/\sqrt{3}N_{21}$ $N_1/N_{22}$

Fuente: José María Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 238

### 3.7.2. Bobinas de reactancia

Las bobinas de reactancia constituyen uno de los elementos auxiliares de importancia en los variadores de frecuencia.

Se emplean para el circuito intermedio de corriente en los convertidores de este tipo y sus finalidades son las siguientes:

- Disminuir el rizado de la intensidad continua en este circuito.
- Servir de almacén energético (de muy corta duración) con lo que el convertidor mejorara el comportamiento de los regimenes transitorios, al formar un circuito oscilante con los condensadores de este circuito.
- Para construir filtros de armónicos.

### **3.7.3 Condensadores**

Se utilizan condensadores electroestáticos para diversas funciones, en el convertidor de frecuencia, las cuales pueden ser almacenamiento energético, almacenamiento energético para los circuitos de conmutación, principalmente de tiristores. A la vez se pueden utilizar estos para construir filtros de armónicos, para construir circuitos de protección de sobretensiones para semiconductores.

### **3.7.4. Protecciones empleadas en variadores de frecuencia**

En el diseño de variadores de frecuencia se utilizan protecciones para limitar sobretensiones, sobre intensidades, y los crecimientos muy fuertes de tensión e intensidad  $\partial u / \partial t$  y  $\partial i / \partial t$  que son dañinos para los semiconductores de potencia.

### 3.7.4.1. Protección contra sobretensiones

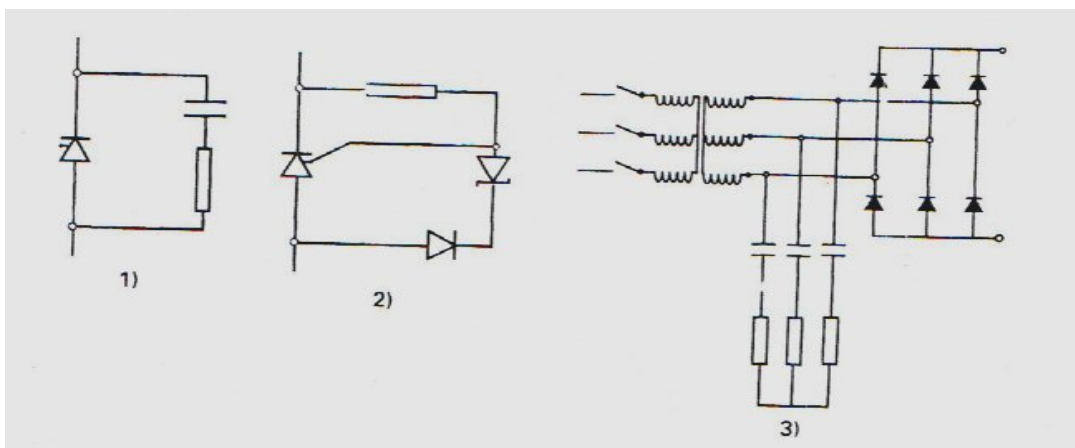
Tienden a ser las más peligrosas en el lado de la red y por tanto el rectificador de entrada al convertidor de frecuencia. Además también originan sobretensiones en los semiconductores cuando están conmutando, estos son de menor contenido energético pero el problema puede ser importante ya que los semiconductores son menos inmunes a las sobretensiones que los equipos electromagnéticos convencionales. Hay dos efectos permisivos principales sobre los semiconductores de potencia:

- Con sobretensiones en el sentido de bloqueo que sobrepases el valor momentáneo máximo que el semiconductor puede resistir quedará afectada la pastilla semiconductor y perderá la capacidad de bloqueo.
- Si las sobretensiones se dan en el sentido de conducción esta puede pasar a conducción indeseada sin recibir señal de puerta. Se observa en la figura 34 diversos modos de protección contra sobretensiones. Se enumeran de 1 a 3.
- La protección número 1 es más empleada y se conoce comúnmente por su designación en inglés "*Snubber*". Los semiconductores de potencia se eligen con un margen de seguridad de 2.5 veces en los que se refiere a su capacidad para resistir tensiones, aun así que protegerlos contra fortísimos picos que pueden aparecer tal como se acaba de mencionar. La forma más sencilla de supresión de sobretensiones es la de puentear al semiconductor con la asociación en serie de un condensador y de una resistencia.

La curva de carga de un condensador es más lenta que el crecimiento de tensión en los picos y así se puede limitar. La resistencia en serie amortigua las oscilaciones que tiene el circuito formado por el condensador y la inductancia parasita que se encuentra en el circuito, también limita la intensidad inicial sobre el condensador.

- El sistema marcado como 2 sirve para proteger el semiconductor de las sobretensiones de desconexión del convertidor de frecuencia del lado de la red. La disposición esta basada en un diodo zener con un umbral de tensiones determinado.
- Con la protección 3, vemos la forma de proteger al rectificador de entrada de las sobretensiones procedentes de la red de alimentación y de sus trasformador, esta basado en un red R-C trifásica.

**Figura 35. Protecciones utilizadas en variadores de frecuencia**



Fuente: José Maria Merino Azcarraga, Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna, pág. 240

### **3.8. Motores Asíncronos**

Los motores asíncronos trifásicos de jaula se encuentran entre los más utilizados para el accionamiento de máquinas. El uso de estos motores se impone en la mayoría de las aplicaciones debido a las ventajas que con llevan: robustez, sencillez de mantenimiento, facilidad de instalación, bajo costo.

#### **3.8.1. Principio de funcionamiento**

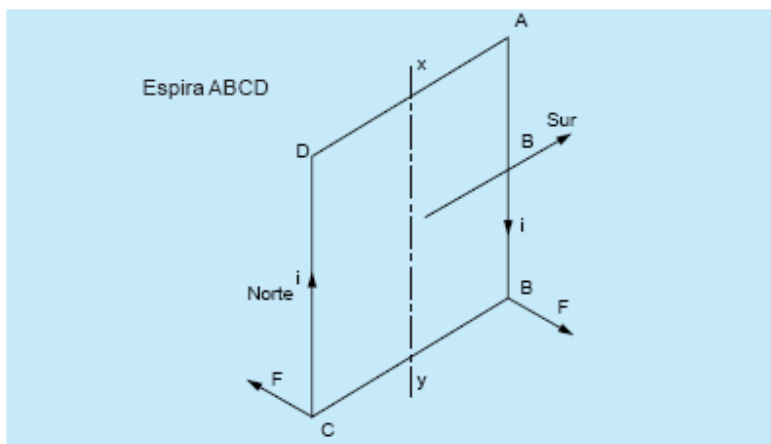
El principio de funcionamiento de un motor asíncrono se basa en la creación de corriente inducida en un conductor cuando éste corta las líneas de fuerza de un campo magnético, de donde proviene el nombre “motor de inducción”. Imagine una espira ABCD en cortocircuito situada en un campo magnético  $B$  y móvil alrededor de un eje  $xy$ . Si se hace girar el campo magnético en el sentido de las agujas del reloj, la espira queda sometida a un flujo variable y se convierte en el soporte de una fuerza electromotriz inducida que origina una corriente inducida  $i$  (ley de Faraday).

Es posible definir el sentido de la corriente de los conductores activos AB y CD mediante la aplicación de la regla de los tres dedos de la mano izquierda. La corriente inducida circula de A a B en el conductor AB y de C a D en el conductor CD. Según la ley de Lenz, el sentido de la corriente es tal que se opone por su acción electromagnética a su causa de origen.

Cada uno de los dos conductores se somete por tanto a una fuerza  $F$ , en sentido opuesto a su desplazamiento relativo con respecto al campo inductor, la regla de los tres dedos de la mano derecha (acción del campo sobre una corriente) permite definir fácilmente el sentido de la fuerza  $F$  que se aplica a cada conductor, el pulgar se sitúa en el sentido del campo del inductor,

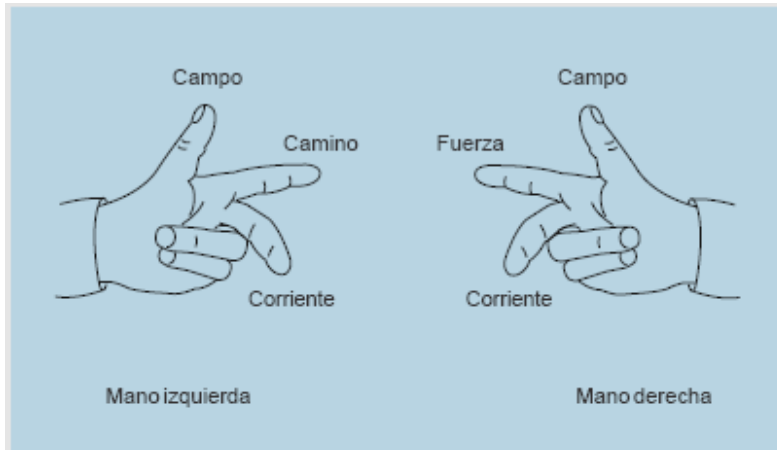
El índice indica el sentido de la fuerza, el dedo del corazón se sitúa en el sentido de la corriente inducida; por tanto, la espira se somete a un par que provoca su rotación en el mismo sentido que el campo inductor, denominado campo giratorio. En la figura siguiente se muestra su principio de operación.

**Figura36. Espira de alambre cortocircuitada en campo magnético**



Fuente: internet

**Figura 37. Ley de la mano derecha, para dirección campo magnético**



Fuente: internet

### **3.8.2 Componentes de un motor asíncrono**

Un motor asíncrono trifásico consta de dos partes principales:

- un inductor, o estator,
- un inducido, o rotor.

#### **3.8.2.1 El estator**

Es la parte fija del motor, una carcasa de metal fundido o de aleación ligera encierra una corona de chapas delgadas (del orden de 0,5 mm de espesor) de acero al silicio. Las chapas quedan aisladas entre sí por oxidación o por barniz aislante, la “*laminación*” del circuito magnético reduce las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault.



Las chapas disponen de ranuras en las que se sitúan los devanados estatóricos que producen el campo giratorio (tres devanados en el caso de un motor trifásico). Cada devanado se compone de varias bobinas. El modo de acoplamiento de las bobinas entre sí determina el número de pares de polos del motor y, por tanto, la velocidad de rotación.

### **3.8.2.2. El rotor**

Es la parte móvil del motor. Al igual que el circuito magnético del estator, se compone de un apilamiento de chapas delgadas aisladas entre sí que forman un cilindro enchavetado sobre el eje del motor.

### **3.8.2.3 Rotor de jaula simple**

Existen unas ranuras ubicados hacia el exterior del cilindro en los que se sitúan los conductores conectados a cada extremidad por medio de una corona metálica y sobre los que se aplica el par motor que genera el campo giratorio. Los conductores se inclinan ligeramente con respecto al eje del motor para que el par sea regular. El conjunto tiene el aspecto de una jaula, lo que explica el nombre de este tipo de rotor.

El par de arranque de estos motores es relativamente débil y la corriente que se absorbe durante la puesta bajo tensión es muy superior a la corriente nominal.

#### **3.8.2.4. Rotor de doble jaula**

Este es el tipo de rotor más utilizado. Consta de dos jaulas concéntricas, una exterior de gran resistencia y otra interior más débil. Al iniciarse el arranque, dado que el flujo es de elevada frecuencia, las corrientes inducidas se oponen a su penetración en la jaula interior. El par que produce la jaula exterior resistente es importante y se reduce la corriente solicitada. Al finalizar el arranque, la frecuencia disminuye en el rotor y se facilita el paso del flujo a través de la jaula interior. El motor pasa a comportarse como si constara de una sola jaula poco resistente. En régimen estable, la velocidad sólo es ligeramente inferior a la del motor de jaula simple.

#### **3.8.2.5. El rotor bobina (rotor de anillos)**

Unos devanados idénticos a los del estator se sitúan en las ranuras de la periferia del rotor, que generalmente es trifásico. Una de las extremidades de cada uno de los devanados está unida a un punto común (acoplamiento en estrella). Las extremidades libres pueden conectarse a un acoplador centrífugo o a tres anillos de cobre aislados y solidarios del rotor. Varias escobillas de grafito conectadas al dispositivo de arranque frotan los anillos. Dependiendo del valor de las resistencias insertadas en el circuito retórico, este tipo de motor puede desarrollar un par de arranque que alcanza 2,5 veces el valor del par nominal. La punta de corriente durante el arranque es prácticamente igual a la del par.

### **3.8.3. Problemas que surgen en el arranque de motores asíncronos.**

- El pico de corriente en el arranque puede perturbar el funcionamiento de otros aparatos conectados a la red.
- Las sacudidas mecánicas que se producen durante los arranques y las paradas pueden ser inaceptables para la máquina así como para la seguridad y comodidad de los usuarios.
- Funcionamiento a velocidad constante.

Los arrancadores y variadores de velocidad electrónicos eliminan estos inconvenientes. Adecuados para motores de corriente tanto alterna como continua, garantizan la aceleración y deceleración progresivas y permiten adaptar la velocidad a las condiciones de explotación de forma muy precisa. Según la clase del motor, se emplean variados de tipo rectificador controlado, convertidor de frecuencia o regulador de tensión.

### **3.8.4. Convertidor de frecuencia para motor Asíncrono**

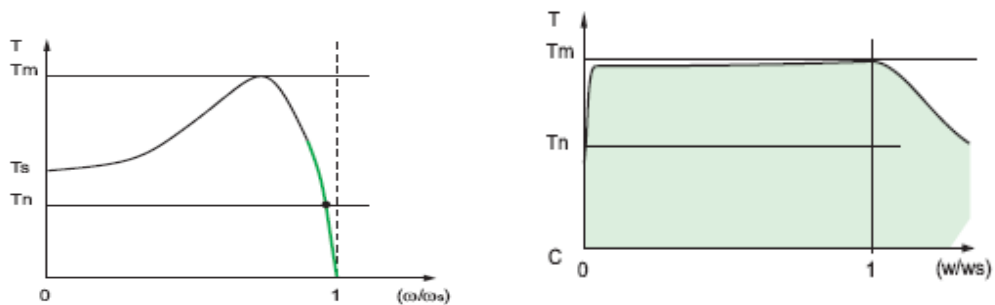
Para obtener un par constante a cualquier velocidad, es necesario mantener el flujo constante. Para ello, la tensión y la frecuencia deben evolucionar simultáneamente y en idéntica proporción. El convertidor de frecuencia, que se alimenta en la red a tensión y frecuencia fijas, garantiza la alimentación del motor a corriente alterna con tensión y frecuencia variables, en base a las exigencias de velocidad. Dos rampas se encargan de regular la aceleración y la deceleración.

**Figura 38. Comparación de las características de funcionamiento que de un variador de frecuencia comparado con un arranque normal**

Motor asíncrono	... en uso normal	...con variador de velocidad
Corriente de arranque	Muy elevada, del orden de 8 veces la corriente nominal en valor eficaz, 15 - 20 veces en valor cresta	Limitado en el motor (en general: cerca de 1,5 veces la corriente nominal)
Par de arranque $C_d$	Elevado y no controlado, del orden de 2 a 3 veces el par nominal $C_n$	Del orden de 1,5 veces el par nominal $C_n$ y controlado durante toda la aceleración
Arranque	Brutal, cuya duración sólo depende de las características del motor y de la carga arrastrada (Par resistente, inercia)	Progresivo, sin brusquedades y controlado (rampa lineal de velocidad, por ejemplo)
Velocidad	Variando ligeramente según la carga (Próxima de la velocidad de sincronismo $N_s$ )	Variación posible a partir de cero hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo $N_s$
Par máximo $C_m$	Elevado, del orden de 2-3 veces el par nominal $C_n$	Elevado disponible para todo el rango de velocidades (del orden de 1,5 veces el par nominal)
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema particular	Fácil
Inversión del sentido de marcha	Fácil solamente después de parada motor	Fácil
Riesgo de bloqueo	Sí, en caso de exceso de par (par resistente > $C_m$ ), o en caso de bajada de tensión	No
Funcionamiento del motor en el plano par-velocidad	Cf. fig. 2	Cf. fig. 3

Fuente: Manual de esquemas, automatización y distribución, Moeller.

**Figura 39. Curva par velocidad de motor normal (Izquierda), y curva par-velocidad alimentado con variador de frecuencia (derecha).**



Fuente: Manual de esquemas, automatización y distribución, Moeller.

### **3.8.5. Ventajas de la utilización del variador de velocidad en el arranque de motores asíncronos.**

- La conexión del cableado es muy sencilla.
- Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos.
- Controla la aceleración y el frenado progresivo.
- Limita la corriente de arranque.
- Permite el control de rampas de aceleración y deceleración regulables en el tiempo.
- Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia
- Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo. Protege al motor.
- Puede controlarse directamente a través de un autómatas o microprocesador.
- Se obtiene un mayor rendimiento del motor.
- Nos permite ver las variables (tensión, frecuencia, rpm, etc....).

### **3.8.6. Frenado de motor asíncrono con variador de frecuencia**

Este frenado consiste en parar un motor pero sin controlar la rampa de desaceleración. Con los arrancadores y variadores de velocidad para motores asíncronos, esta función se realiza de forma económica inyectando una corriente continua en el motor, haciendo funcionar de forma especial la etapa de potencia.

Toda la energía mecánica se disipa en el rotor de la máquina y, por tanto, este frenado sólo puede ser intermitente. En el caso de un variador para motor

de corriente continua, esta función se realiza conectando una resistencia en bornes del inducido.

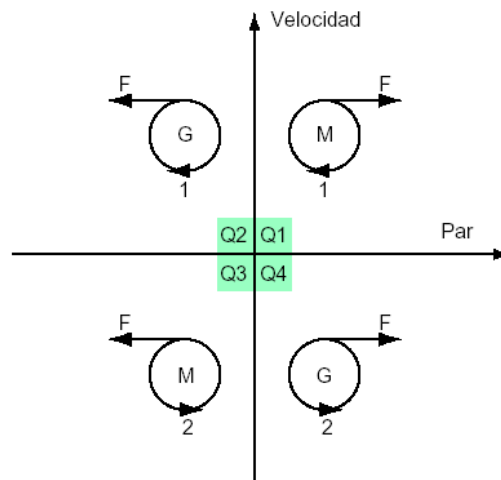
### **3.8.7. Principales modos de funcionamiento de un variador de frecuencia**

Los variadores de velocidad pueden, según el convertidor electrónico, o hacer funcionar un motor en un solo sentido de rotación, y se llaman «unidireccionales», o en los dos sentidos de la marcha, y se llaman entonces «bidireccionales».

Los variadores son «reversibles» cuando pueden recuperar la energía del motor al funcionar como generador (modo frenado). La reversibilidad se obtiene o retornando la energía hacia la red (puente de entrada reversible), o disipando la energía recuperada en una resistencia con un chopper de frenado.

La figura muestra las cuatro situaciones posibles de la gráfica par-velocidad de una máquina, resumidas en la tabla que le acompaña. Hay que indicar que cuando la máquina funciona como generador recibe una fuerza de arrastre. Este estado se utiliza especialmente para el frenado. La energía cinética disponible en el eje de la máquina, o se transfiere a la red de alimentación, o se disipa en las resistencias, o, para pequeñas potencias, en la misma máquina, como pérdidas.

**Figura 40. Modos de operación en los cuadrantes de un motor asíncrono para un variador de frecuencia**



Sentidos rotación	Funcionamiento	Par -C-	Velocidad -n-	Producto C.n	Cuadrante
1 (horario)	Como motor	sí	sí	sí	1
	Como generador		sí		2
2 (antihorario)	Como motor			sí	3
	Como generador	sí			4

Fuente: Manual de esquemas, automatización y distribución, Moeller.

#### 4. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE UN SISTEMA DE CONTROL

#### **4.1. Sistemas de control**

En primer uso de los sistemas de control en la industria parece haber sido el regulador centrífugo de la máquina de vapor de Watt en el año 1775 aproximadamente. Este aparato fue utilizado para regular la velocidad de la máquina manipulando el caudal de vapor por medio de una válvula

El primer análisis de un sistema de control es la explicación matemática del regulador centrífugo por James Clerk Maxwell en 1868. Mas tarde la técnica del regulador se adjudicó a otras máquinas y turbinas y a principio del siglo XX comenzó la aplicación de reguladores y servomecanismos en reguladores de energía térmica al gobierno de buques. La primera teoría general sobre control automático, pertenece a Nyquist en el famoso artículo "Teoría de la regeneración ". Este estudio sentó las bases para la determinación de la estabilidad de sistemas sin necesidad de resolver totalmente las ecuaciones diferenciales. Otros desarrollos en servomecanismos y amplificadores eléctricos dieron origen a muchas técnicas de frecuencia y lugar geométrico que se usan hoy en día. Las aplicaciones generales al control de procesos no comenzaron hasta la década del 30. Las técnicas de control se consagraron rápidamente, tal es así que ya en los años 40 funcionaban redes de control relativamente complejas.

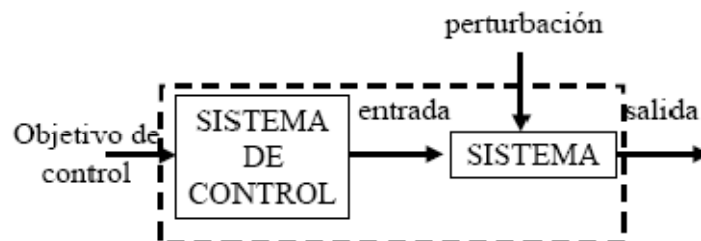
Benjamin C Kuo define un sistema de control como el arreglo de componentes físicos relacionados de tal manera que comandan, regulan o dirigen, a sí mismos o a otros sistemas. También Katsuhiko Owata define el



sistema de control como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado.

Los sistemas de control son esenciales en el control numérico de las máquinas-herramienta de las industrias de manufactura, en el diseño de sistemas de pilotos automáticos en la industria aeroespacial, y en el diseño de automóviles y camiones en la industria automotriz. También es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de proceso.

**Figura 41. Sistema de control.**



**Fuente: Katsuhico Ogata, Ingeniería de control moderno, Editorial Prentice Hall, tercera edición**

El objetivo principal de un sistema de control es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el setpoint, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla.

En consecuencia, el sistema de control exige generalmente un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana. En la actualidad los lazos de control son un elemento esencial para la manufactura

económica y prospera de virtualmente cualquier producto, desde el acero hasta los productos alimenticios.

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
2. Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
3. Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Es necesaria la comprensión del principio del control automático en la ingeniería moderna, por ser su uso tan común como el uso de los principios de electricidad o termodinámica, siendo por lo tanto, una parte de primordial importancia dentro de la esfera del conocimiento de ingeniería. También son tema de estudio los aparatos para control automático, los cuales emplean el principio de realimentación para mejorar su funcionamiento.

Los sistemas de control abundan en el medio ambiente del hombre. Antes de mostrar esto, se definirán los términos entrada y salida que ayudarán a identificar o definir al sistema de control. La entrada es el estímulo o la

excitación que se aplica a un sistema de control desde una fuente de energía externa, generalmente con el fin de producir de parte del sistema de control, una respuesta especificada.

Es posible determinar o definir la naturaleza de los componentes del sistema. Los sistemas de control pueden tener más de una entrada o salida. Existen dos tipos básicos de sistemas de control:

1. Sistemas de control manuales: operados por el hombre
2. Sistemas de control automáticos: Dispositivo controlado neumático, eléctrico, hidráulico, electrónico o digital.

#### **4.2. Diferencias entre control manual y control automático.**

Cuando se conduce un automóvil, el tripulante debe considerar ciertas variables. La velocidad es una de esas variables, la cual es necesaria para reunir información acerca de que tan rápido avanza el auto. El velocímetro indica la velocidad actual del auto. La velocidad límite del auto indica la velocidad deseada del auto. Estos valores pueden ser comparados para tomar una decisión. El estado actual de la variable comparado con el estado deseado es lo que determina una apropiada acción, con el objeto de aumentar o disminuir la velocidad, o simplemente no llevar a cabo ninguna acción.

Una vez que la decisión ha sido tomada e implementada, el siguiente paso es verificar de nuevo la velocidad del auto, para determinar que efecto han tenido los cambios hechos con anterioridad. Cuando la información ha sido

reunida, se ha tomado una decisión y realizado una acción, se dice que se lleva a cabo un control manual del auto. La decisión de aumentar, disminuir, o mantener la velocidad del auto, es realizada automáticamente por un instrumento. El control que se realiza por medio de instrumentos, se dice que es un control automático.

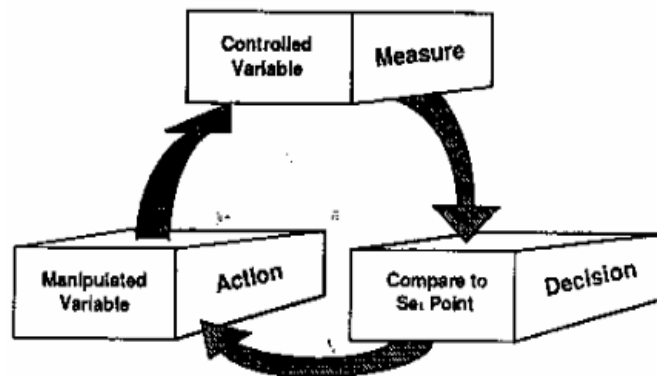
### **4.3. Variables de proceso**

En todo proceso tenemos diversas variables, las cuales afectan las entradas o salidas del proceso. Temperatura, nivel, flujo, presión, son las variables más comunes en los procesos industriales, las cuales son monitoreadas y controladas por medio de la instrumentación del proceso. Podemos distinguir distintas variables que se utilizan en los sistemas de control en las cuales podemos mencionar:

- Variable de entrada: es una variable del sistema tal que una modificación de su magnitud o condición puede alterar el estado del sistema.
- Variable controlada: es una variable del sistema que se mide o controla.
- Variable manipulable: es la variable que ha sido manipulable para llevar el sistema al setpoint dada por el sistema de control.
- Perturbación o upset: es una señal que tiende a afectar el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se la denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y constituye una entrada

- Setpoint es cualquier **punto de ajuste** de alguna variable de un sistema de control automático. Puede ser: Nivel; presión, temperatura; desplazamiento; rotación; etc.

**Figura 42. Identificación de variables utilizadas en el sistema de control.**



Fuente: Feedback control, Instrument Technology Training Program. ISA

#### **4.4. Clasificación de los sistemas de control**

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y lazo cerrado. La distinción la determina la acción de control, que es la que activa al sistema para producir la salida.

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida. Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida. Los sistemas de control a lazo abierto tienen rasgos sobresalientes, uno de ellos es la habilidad que éstos tienen para ejecutar una acción con exactitud

está determinada por su calibración. Calibrar significa establecer o restablecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.

Un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado. Un ejemplo sería el sistema de control de temperatura de una habitación, midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (la temperatura deseada o set point), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se conserve en un nivel cómodo sin considerar las condiciones externas.

#### **4.4.1. Sistema de control de lazo abierto**

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se retroalimenta para compararla con la entrada. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia; por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado.

La precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada.

En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control retroalimentado. Observe que cualquier sistema de control que opere con una base de tiempo es en lazo abierto. A continuación se mencionan algunas características importantes del sistema de control con lazo abierto:

1. No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia).
2. Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada.
3. La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.
4. En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.

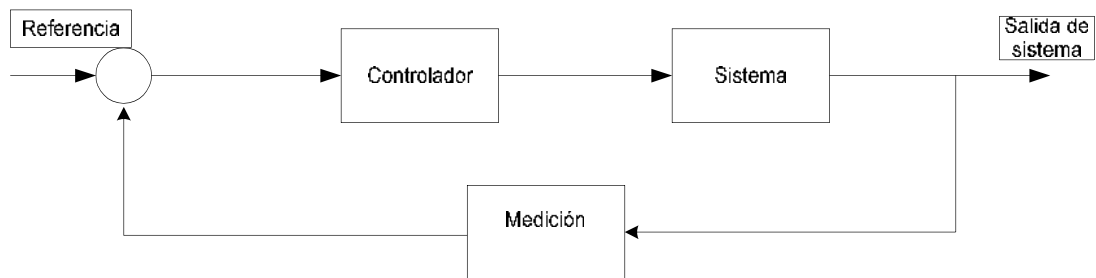
#### **4.4.2. Sistema de control de lazo cerrado**

Los sistemas de control retroalimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control retroalimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente.

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo

cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

**Figura 43. Lazo de control cerrado**



En el control de lazo cerrado podemos distinguir diferentes elementos que actúan en los cuales son realimentación, actuador final, proceso, el control automático

#### **4.4.2.1. Retroalimentación**

Es la propiedad de un sistema de lazo cerrado que permite que la salida (o cualquier otra variable controlada del sistema) sea comparada con la entrada



al sistema (o con una entrada a cualquier componente interno del mismo con un subsistema) de manera tal que se pueda establecer una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida. Generalmente se dice que existe retroalimentación en un sistema cuando existe una secuencia cerrada de relaciones de causa y efecto ente las variables del sistema.

#### **4.4.2.2. Características de la retroalimentación:**

Los rasgos más importantes que la presencia de retroalimentación imparte a un sistema son:

- Aumento de la exactitud. Por ejemplo, la habilidad para reproducir la entrada fielmente.
- Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones en las características del sistema.
- Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- Aumento del intervalo de frecuencias (de la entrada) en el cual el sistema responde satisfactoriamente (aumento del ancho de banda).
- Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad. Generalmente si es retroalimentación positiva.

#### **4.4.2.3. Actuador final y/o elemento final de control**

Por cada proceso debe haber un actuador final, que regule el suministro de energía o material al proceso y cambie la señal de medición. La posición del

elemento final de control está determinada por los controladores. Específicamente la posición del elemento final de control está determinada por la o las señales representando el valor de la desviación que es transmitida al controlador. El diseño de un elemento final de control está determinado por las necesidades del sistema de control.

A menudo éstos pueden ser válvulas de control, bombas, bombas de medición, relevadores, ventiladores con aspas ajustables, son algunos tipos de elementos finales de control más comunes. Otros tipos de elementos finales de control son: variadores de velocidad, bombas o compresores, y bandas ajustables de velocidad en sistemas de transportación. La aplicación es la que dicta que tipo de mecanismo es el adecuado para el control de las variables en el proceso, etc.

#### **4.4.2.4. Proceso**

Los tipos de procesos encontrados en las plantas industriales son tan variados como los materiales que producen. Estos se extienden desde lo simple y común, tales como los lazos que controlan caudal, hasta los grandes y complejos como los que controlan columnas de destilación en la industria petroquímica.

#### **4.4.3 Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con los sistemas en lazo abierto**

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la retroalimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Por tanto, es posible usar componentes relativamente precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, en tanto que hacer eso es imposible en el caso de un sistema en lazo abierto. Desde el punto de vista de la estabilidad, el sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, porque la estabilidad del sistema no es un problema importante.

Por otra parte, la estabilidad es una función principal en el sistema de control en lazo cerrado, lo cual puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante.

Debe señalarse que, para los sistemas en los que se conocen con anticipación las entradas y en los cuales no hay perturbaciones, es aconsejable emplear un control en lazo abierto. Los sistemas de control en lazo cerrado sólo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones impredecibles y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema.

## **4.5. Descripción del lazo de control**

### **4.5.1. Control Feedback**

La realimentación, también llamado retroalimentación o por su traducción en [inglés](#) feedback. En un sistema de control, éste tiene entradas y salidas del sistema; cuando parte de la señal de salida del sistema, vuelve de nuevo al sistema como parte de su entrada, se llama a esto retroalimentación. Esto es de uso frecuente para controlar el comportamiento dinámico del sistema.

El control por feedback se utiliza generalmente cuando se requiere una mayor efectividad y precisión, en el control realizado a la vez se encuentra capacitado para compensar el sistema antes que los disturbios afecten a la variable controlada, es decir los disturbios son medidos y controlados antes de que afecten el proceso. Los controladores por retroalimentación se clasifican en:

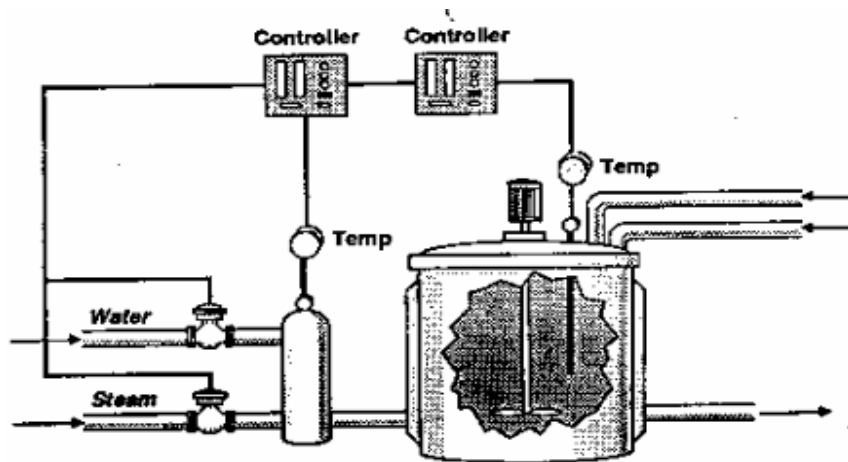
- Controlador con acción inversa: Controlador que ante un incremento positivo (+) respecto del valor deseado de la variable controlada, responde a un incremento negativo (-) de la variable manipulada.
- Controlador con acción directa: Controlador que ante un incremento positivo (+) de la variable controlada, responde con un incremento positivo (+) de la variable manipulada.

#### **4.5.2. Control en cascada**

El control en cascada a menudo puede controlar un proceso más precisamente que un sencillo lazo de control retroalimentado, porque el control en cascada permite que una segunda variable sea monitoreada en adición a la variable controlada. En aplicaciones del control de cascada, la selección de la segunda variable está basada en la capacidad para reflejar rápidamente cualquier disturbio a la variable manipulada. El control en cascada es un lazo de control instalado dentro de otro lazo de control.

El esquema de control feedback solo emplea un controlador, mientras que en el esquema de control en cascada se emplean dos controladores. El controlador externo se llama controlador “maestro” (o primario), el controlador interno se llama controlador “esclavo” (o secundario).

Figura 44. Ejemplo de control en cascada.



Fuente: Feedback control, Instrument Technology Training Program. ISA

En el esquema de control feedback el set-point del controlador se fija externamente (normalmente lo fija el operador del proceso). En el esquema de control en cascada el set-point de la variable a controlar sigue siendo fijado de manera externa. Sin embargo, el set-point del controlador esclavo es fijado por

el controlador maestro. Es decir, la salida o resultado que produce el controlador maestro es simplemente el set-point al que debe operar el controlador esclavo

### **4.5.3. Control feedforward**

El efecto de las perturbaciones sobre el proceso a controlar, consiste en alejar a este del punto de operación deseado. En el esquema de control feedback tradicional, el controlador corrige por desviaciones en el punto de operación solamente hasta que la perturbación ha afectado a la operación del proceso.

Una idea que se ha explotado para mejorar el desempeño de esquemas de control consiste en la posibilidad de medir las perturbaciones que ingresan al proceso, de manera tal que el controlador actúe sobre la planta aun antes de que tales perturbaciones alejen al proceso del set-point deseado.

Para lograr este propósito, la perturbación medida se alimenta a un controlador denominado feedforward (o de prealimentación) el cual genera una acción de control para tratar de mantener a la variable controlada y cerca del set-point

Este tipo de control se utiliza en aplicaciones en las que no pueden tolerarse desviaciones en el set point. También es utilizado en combinación con el control retroalimentado para alcanzar el punto necesario de exactitud o precisión que la aplicación requiere

## **4.6. Tipos de acciones de control**

En algunos procesos no se requiere un control muy complejo, esos procesos operan con gran éxito con un alto rango de tolerancia. Otros procesos requieren un control mucho más complejo, por lo tanto el proceso es el que determina que tipo de control se requiere.

En los sistemas de control en lazo cerrado se clasifican normalmente de acuerdo con la acción correctora que el controlador provoca cuando detecta una desviación entre la variable controlada y la deseada de consigna. A continuación se describirán las acciones de control usadas habitualmente.

### **4.6.1. Acción de dos posiciones**

También denominada acción todo–nada; el dispositivo controlado puede posicionarse únicamente en una de sus dos posiciones posibles; en la posición máxima o de marcha o en la posición mínima o de paro.

Habitualmente el controlador genera cada una de las acciones de control en puntos distintos, separados por incierto intervalo diferencial ajustado manualmente, lo que se traduce en un menor número de maniobras cuando mayor sea el margen diferencial.

#### **4.6.2. Acción temporizada de dos posiciones**

Es una variante común de la acción de dos posiciones pura y se usa a menudo para reducir el margen diferencial de los termostatos de ambiente que gobiernan los sistemas de refrigeración, dentro del margen diferencial el controlador genera la acción de marcha durante un tiempo que es proporcional a las necesidades de carga, mientras el tiempo de ciclo (tiempo de marcha más tiempo de paro), permanece relativamente constante.

#### **4.6.3. Acción flotante**

Es similar a una acción de dos posiciones, el controlador puede provocar, o el elemento controlado aceptar, una acción tendente a corregir la desviación de la variable controlada fuera de una zona muerta establecida, entre los dos límites de esta zona, el dispositivo controlado está dentro del margen diferencial del controlador. Cuando la variable controlada sale del diferencial del controlador, este provoca una acción de control tendente a mover el dispositivo controlado en la dirección apropiada.

#### **4.6.4. Acción proporcional (P)**

Se observa que el controlador on-off provoca oscilaciones en la variable de salida, esto es debido a que pequeños cambios en el error hacen que la



variable manipulable cambie bruscamente. Este efecto es apaciguado por el control proporcional, donde su característica principal es que su acción sobre la variable manipulable es proporcional al error. La acción de control proporcional puede tranquilizar mucho al control / proceso y reducir oscilaciones.

En ocasiones los controladores disponen de un ajuste de ganancia,  $K_p$ , en lugar del ajuste de banda proporcional. Debe entenderse por ganancia la relación existente entre la señal de la acción de control y la señal de la variable controlada; es la inversa de la banda proporcional.

#### **4.6.5. Acción proporcional integral (PI)**

Esta acción de control esta compuesta por la suma de dos acciones: la acción proporcional simple y la acción integral. La acción integral tiende a eliminar el error en régimen estacionario que se produce bajo la acción de un control proporcional, es decir proporciona al dispositivo controlado una señal adicional que tiende a minimizar la diferencia entre el valor de medida y el valor de consigna en condiciones estables.

La acción correctora a la salida de un controlador PI responde a la ecuación:

$$S_{pi} = K_p \varepsilon + K_i \int \varepsilon dt$$

Donde  $S_{pi}$  es la acción correctora de salida del controlador

$K_p$  es el denominado factor de proporcionalidad

$\varepsilon$  es el error, o sea, la diferencia entre la consigna y la variable medida.

$K_i$  es el denominado factor de acción integral.

El primer término del segundo miembro de la expresión,  $K_p \varepsilon$ , corresponde a la componente de acción proporcional y el segundo corresponde a la componente de acción integral. Obsérvese que el primer término participa en la acción correctora total con un factor exclusivamente proporcional al error, mientras que el segundo término lo hace, además, mediante el factor de proporcionalidad al tiempo de permanencia del error, es decir, si el error persiste durante un tiempo prolongado la salida evolucionara para intentarlo eliminar.

#### **4.6.6. Acción proporcional derivativa (PD)**

La acción de control derivativa genera una señal de control proporcional a la derivada de la señal de error, De este modo, el control derivativo mediante la derivada de la señal de error 'conoce' sus características dinámicas (crecimiento o decrecimiento), produciendo una corrección antes de que la señal de error sea excesiva.

A este efecto se le denomina acción anticipativa. Resumiendo, la acción de control derivativa añade sensibilidad al sistema y tiene un efecto de aumento de estabilidad relativa

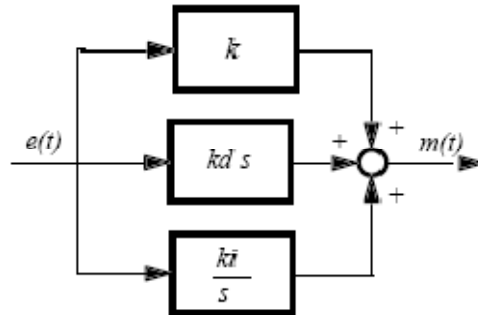
El control proporcional derivativo proporciona al sistema una mayor estabilidad relativa que se traduce en una respuesta transitoria con menor sobre-impulso. Sin embargo, cuando la influencia del control es muy grande, el sistema de control tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta. Existen dos posibles métodos de diseño, según se priorice el cumplimiento de las condiciones de régimen estacionario o transitorio en las respuestas temporales.

El primer método obtiene una determinada respuesta temporal transitoria, quedando el régimen estacionario de la respuesta temporal en función del diseño realizado. El segundo método fija una determinada respuesta temporal en régimen permanente, quedando las condiciones de régimen temporal transitorio en función del diseño realizado

#### **4.7. Control proporcional integral derivativo (PID)**

La acción de control proporcional integral derivativa (PID) genera una señal resultado de la combinación de la acción proporcional, la acción integral y la derivativa conjuntamente, continuación se muestra la estructura en diagrama de bloques del controlador.

**Figura 45. Acción proporcional-integral-derivativa (PID)**



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional\\_integral\\_derivativo](http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo)

La acción de control proporcional integral derivativa permite eliminar el error en estado estacionario, logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control. La mejora de estabilidad relativa implica una respuesta transitoria con tiempos de adquisición y un valor de máximo sobre impulsos pequeños.

La selección de las constantes de ganancia proporcional, integral y derivativa es crítica y revierte es la estabilidad del sistema. Un ajuste apropiado de estos parámetros esencialmente se manifiesta en una menor desviación y una mayor exactitud del sistema de control

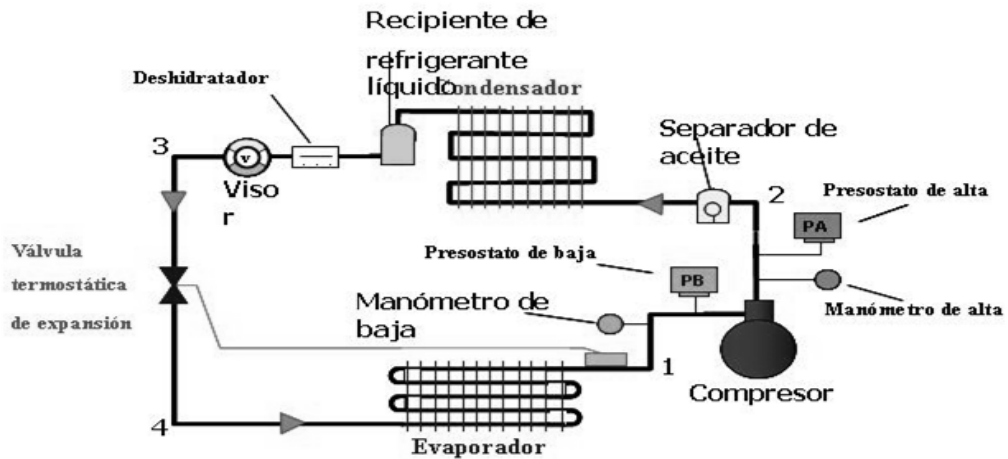
#### 4.8. Elementos que componen el lazo de control en un cuarto frío

Desde un punto de vista funcional, los elementos que actúan en el sistema de control de un cuarto frío, tiene como fin mantener la temperatura, humedad, movimiento del aire a presiones adecuadas dentro las gamas de condiciones deseadas.

Es evidente que la velocidad de refrigeración debe controlarse para que pueda disponerse de diversos grados de confort mantenidos automáticamente. Esta posibilidad se consigue en general controlando los periodos de funcionamiento del compresor.

En la mayoría de cuartos fríos, los ventiladores del condensador y del evaporador funcionan constantemente mientras el compresor funciona intermitentemente; los periodos cíclicos del compresor se determinan con el elemento sensible llamado termostato.

**Figura 46. Equipo de cuarto refrigerado**



Fuente: Mr. Winter, (catalogo), Mr. Winter Inc, Estados Unidos

El equipo bajo control consta del equipo de calefacción o los enfriadores, ventiladores, compresores; válvulas de expansión; los cuales actúan directamente para conseguir aproximadamente el resultado deseado.

Generalmente se proveen de límites de control, que el equipo llega a proporcionar la mas alta o baja temperatura; el límite de control retroalimenta sus instrucciones al control actuador y la operación es detenida.

La retroalimentación del equipo en si produce un resultado final haciendo operar al dispositivo regulador. Por ejemplo cuando en el cuarto se ha conseguido la temperatura deseada las señales del regulador, cortan o reducen la capacidad del equipo de calefacción, porque han sido satisfechas las necesidades requeridas por el espacio.

En resumen se encuentra generalmente en el lazo de control un dispositivo sensible (regulador), un dispositivo actuador (control actuador) que controla el equipo y un dispositivo limitador o protector (límite de control) con sus elementos necesarios para retroalimentar otras partes del sistema.

Para conseguir una correcta regulación de las principales variables físicas del sistema de cuarto frío será necesario conocer los diferentes elementos que colaboran en su correcto funcionamiento.

Otros de los controles utilizados y de mayor flexibilidad es colocado en la entrada del evaporador para que pueda admitir más o menos refrigerante (y controlar la diferencia de presión entre el lado de alta y baja presión), para el control del refrigerante que entra al evaporador se utiliza la válvula de expansión.

#### **4.8.1. Termostato**

Un termostato actúa para conectar o interrumpir el circuito en respuesta a un cambio de temperatura. Un sensor térmico que se utiliza de manera común consiste en un elemento bimetalico. Este compuesto de dos tiras de metales diferentes, los metales tienen diferentes coeficientes de dilatación cuando cambia su temperatura. Esto hace que el elemento se curve o se enrolle, a medida que aumenta la temperatura.

En el caso de termostatos de tira-bimetálico resta y de disco, el elemento de control está constituido sencillamente por un juego de contactos. Estos abren y cierran un circuito, según suba o baje la temperatura, según sea su aplicación. La acción eléctrica resultante se utiliza entonces para llevar a cabo la acción deseada.

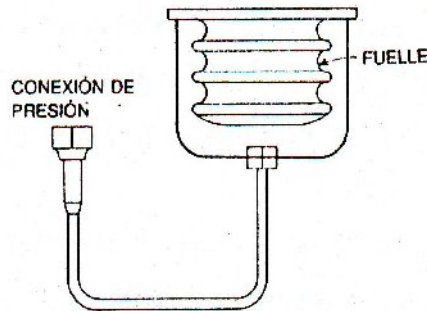
El mecanismo de control, que se utiliza por lo común con el sensor bimetalico en espiral, consiste en un bulbo lleno de mercurio equipado con el juego de contactos.

Otro tipo de sensor utiliza un bulbo equipado con un tubo que lo conecta a un fuelle cerrado. Un bulbo el tubo y el fuelle contienen fluido.- según cambia la temperatura, también cambia la presión del fluido, y hace que el fuelle flexible se expanda o se contraiga. Este movimiento se utiliza para abrir o cerrar un circuito por medio de un eslabonamiento mecánico.

Además del sensor de temperatura del tipo fuelle, se puede utilizar también un diafragma flexible, junto con un bulbo y un tubo de conexión.



**Figura 47. Termostato de bulbo remoto equipado con fuelle**



Fuente: Edward Pita, Principios y sistemas de refrigeración. (México: Editorial Limusa), pág.416

#### **4.8.2. Timer de deshielo**

Frecuentemente es deseable detener el funcionamiento del compresor durante un cierto período de tiempo para permitir la descongelación. Con el fin de asegurar que esto se lleve a cabo de modo regular, y en el momento adecuado, puede utilizarse un “timer” de deshielo o reloj para descongelación, para que abra o cierre los circuitos a intervalos de tiempo predeterminados. Se fabrican relojes para ciclos de 24 horas y de 7 días; puede ajustarse, según se desee, el intervalo de descongelación y el momento de comienzo y finalización de este.

Se utiliza con frecuencia un ciclo de descongelación controlado en su inicio por el tiempo y terminado por una señal. Esto se hace debido a que no siempre se puede estimar de antemano la duración del tiempo de descongelación, el cual puede variar

Cuando termina el ciclo de descongelación, interviene a menudo un dispositivo de retraso de tiempo, el cual retarda la operación del ventilador del evaporador durante un corto periodo, después de que el sistema haya cambiado al ciclo de refrigeración. Se evita así tener que soplar aire caliente y agua, en el espacio del cuarto frío.

**Figura 48. Timer de deshielo**



Fuente: “Componentes de un sistema de refrigeración”, Manual de refrigeración (2): 8-3

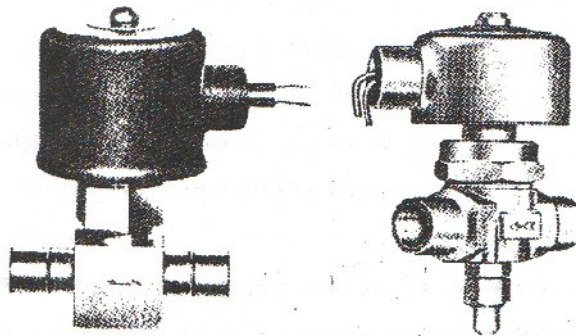
#### **4.8.3. Válvulas solenoides**

Una válvula solenoide es una válvula de control de flujo de refrigeración operado eléctricamente. Esta no es una válvula modulada, sino que abre o cierra completamente. La válvula esta formada por un cuerpo, un vástago con un núcleo de hierro que asienta en el orificio de la válvula y una bobina eléctrica. Una válvula solenoide, normalmente cerrada, se cierra cuando se desenergiza la bobina y el vástago se asienta.

Cuando es energizada la válvula solenoide, el efecto magnético de la bobina eleva el vástago y abre la válvula.

Las válvulas solenoides se utilizan comúnmente en las líneas de refrigerante líquido y gas caliente para detener el flujo de refrigerante cuando no se desea, o para aislar cada evaporador cuando se emplean varios evaporadores. En grandes instalaciones, puede ser necesario el empleo de un gran número de válvulas solenoides para obtener un control automático satisfactorio.

**Figura 49. Válvula solenoide**



Fuente: Edward Pita, Principios y sistemas de refrigeración. (México: Editorial Limusa), pág.416

#### **4.8.4 Controles de presión**

Este tipo de dispositivo de control también se llama presostato. El sensor puede estar constituido, por un fuelle o por un diafragma.

En controles de presión del refrigerante, esta el controlador de baja presión que detecta la presión de succión del refrigerante del compresor, establece el contacto cuando se eleva la presión y lo abre cuando disminuye. Para detectar la presión de descarga, se utiliza por lo general como control de seguridad un controlador de alta presión, que se ajusta para detener el compresor, cuando la presión de descarga excede de un límite seguro. El controlador puede ser restablecido manual o automáticamente.

Los controles de alta y baja presión se combinan a menudo por conveniencia en una sola caja; la combinación se llama controlador de doble presión; en la figura se muestra un tipo de estos controladores de presión. Se utilizan dos sensores separados, pero estos controlan, por lo general, solo a un interruptor.

#### **4.8.5. Elementos controlados**

Los compresores son los encargados de bombear el refrigerante y succionarlo en un estado de vapor a baja presión y descargándolo al condensador a alta presión, es decir, solo responsables de poner en funcionamiento el ciclo mecánico de refrigeración. Por lo tanto si se para la operación del compresor, se detendrá el ciclo de refrigeración y el aire en el área a controlar saldrá a la temperatura ambiente. Al operar el compresor la temperatura del aire comenzara a bajar nuevamente; esta función la realiza el compresor por medio del termostato colocado en el área a controlar.

Otro elemento a tomar en consideración es el ventilador que se encuentra colocado en el evaporador, el cual debe parar si se tiene algún daño mecánico en el, por aparte deberá de seguir funcionando aun cuando el compresor este detenido, pues en muchos ambientes con solo el movimiento del aire se puede obtener la temperatura deseada.

Los motores de los ventiladores del condensador deben funcionar cuando el compresor trabaja y detenerse cuando este pare, con el objetivo de cumplir su función de extraer todo el calor absorbido por el refrigerante al pasar por el serpentín del evaporador.

Elementos como válvulas motorizadas, electroválvulas, son considerados elementos finales de control

#### **4.8.6. Elementos controladores**

Los termostatos son elementos de control que responden directamente a los cambios de temperatura, originando respuestas que ponen en acción otros circuitos tales como compresores, motores, válvulas de regulación, compuertas reguladoras o algún otro equipo de flujo, generalmente estos pueden ser:

- Pared
- Ducto
- Inmersión

#### **4.8.7. Diagrama eléctrico de un cuarto frío**

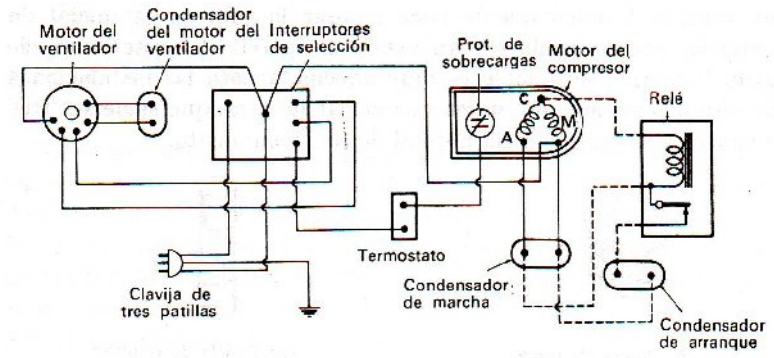
En el esquema que se mostrara en la figura siguiente corresponde a la conexión típica de un cuarto frío pequeño, donde puede seguirse el circuito desde el cable de conexión monofásico, el interruptor esta diseñado de manera que el motor del ventilador pueda funcionar solo o bien con el compresor, pero este no puede funcionar sin que lo haga el ventilador.

En la secuencia normal de funcionamiento, la corriente se aplica al compresor a través del protector de sobrecarga, el cual abre el circuito del compresor tanto en el caso de una excesiva tensión de la red como de un excesivo consumo de corriente porque el compresor se haya atascado. Inicialmente, el condensador de arranque esta conectado hasta que se alcanza la velocidad de régimen, en cuyo momento se desconecta mediante el relé. El condensador de marcha y los devanados de arranque y de marcha permanecen conectados durante el funcionamiento normal del compresor.

Cuando alcanza la posición de mínimo preestablecida, el termostato desconecta el compresor del circuito.

El motor del ventilador, no obstante, no esta controlado por el termostato, sino que continua funcionando durante todo el tiempo en que el interruptor selector esta en la posición de marcha. Normalmente existen dos posiciones de velocidad para controlar el ventilador ventilación normal y alta.

Figura 50. Diagrama eléctrico cuarto frío pequeño



## **5. AUTOMATIZACIÓN DE UN CUARTO FRÍO**

### **5.1. Pasos para la automatización de un cuarto frío**

En los capítulos anteriores se ha estudiado los componentes de un cuarto frío, desde el ciclo de funcionamiento, los elementos que utiliza para sus funcionamientos, tanto mecánicos como eléctricos etc. Sobre los autómatas programables se observo desde su estructura, software, hardware, hasta ventajas y desventajas que trae automatizar. En este capítulo se hace una automatización aplicándola a un cuarto frío, y se proponen los siguientes pasos a seguir.

#### **5.1.1. Conocer el proceso de trabajo de un cuarto frío**

El proceso comienza cuando se coloca una temperatura para las condiciones que se desean tener, esta se fija en el termostato, este inicia el proceso haciendo que el compresor arranque, el arranque que utilizan generalmente estos compresores es un arranque estrella-delta, al momento de arrancar el compresor, se empieza a bombear refrigerante al condensador, a alta presión, este hace el cambio de estado gaseoso a líquido, transfiriendo el calor al exterior, después de ellos se transmite este líquido a la válvula reguladora, la cual regulará la cantidad de líquido refrigerante que será inyectado al proceso, después de la válvula reguladora.



Se tendrá el evaporador, el cual absorberá el calor que se encuentre en nuestro cuarto frío, el cual pasara de una etapa líquida a una etapa gaseosa, para empezar el proceso de nuevo hasta llegar a la temperatura que se desea, el único elemento sensor que se encuentre inmerso en el sistema es el termostato, el cual como ya se a mencionado es un bimetalico, el cual al llegar a la temperatura deseada abre sus contactos, con ello el proceso sigue en su funcionamiento normal.

### **5.1.2 Modelo propuesto para el control de un cuarto frío**

Tomando en cuenta el funcionamiento de un cuarto frío, podemos decir que el control que actualmente se tiene para el es un control tipo *on-off*, ya que al estudiar el proceso actual de este, es que al llegar a la temperatura deseada este termina su proceso, al haber un descenso en la temperatura el sensor que se encuentra en el proceso el termostato, vuelve a activar el mismo, hasta llegar a la temperatura deseada, en función de lo que se esta tratando de mejorar que es el ahorro de energía, este esta consumiendo mas energía ya que aunque tenga un arranque a tensión reducida el cual es un arranque estrella-delta, este se esta realizando cada vez que el proceso de inicia de nuevo, la única regulación que tiene estos procesos son válvulas de expansión, con lo que el compresor se encuentra encendido todo el tiempo, se tiene en realidad poco control sobre el proceso, lo que se propone para disminuir el consumo de energía, es llevar el proceso actual a un control continuo, un control que en realidad monitoree constante el cuarto frio, la variable que se estará monitoreando en todo momento será la temperatura, colocando un lazo de control feedback.

El elemento final de control será la velocidad a la que el motor del compresor este funcionando y que por medio de un control PID, se pueda llegar a tener un lazo de control más estable y que a la vez ayude a llevar a la variable mucho más rápido al setpoint deseado.

## **5.2. Variables a tomar en cuenta en la automatización de un cuarto frío**

Para la automatización de un cuarto frío se tienen que tomar en cuenta las variables que afecten directamente al proceso, las variables que se deberán tomar en cuenta como se ha mencionado son dos la variable controlable y la variable manipulable en este caso definiremos la variable controlable como la temperatura a la cual se va encontrar el cuarto frío, y tendremos nuestra variable manipulable la cual será la velocidad a la cual se mantendrá el compresor.

Se utilizara un variador de frecuencia para manejar la velocidad a la cual se encuentra funcionando el compresor, del porque se utiliza un variador de frecuencia; se tienen varias razones del porque se utiliza, en la mayoría de cuartos fríos la capacidad de los compresores se selecciona de acuerdo a la capacidad máxima esperada del sistema. Dado que las capacidades varían a lo largo del día y del año, los compresores diseñados para las capacidades máximas se consideran sobredimensionados durante períodos largos (se estima que los sistemas están funcionando a carga parcial más de un 65% del tiempo de funcionamiento). En un compresor hermético normal, el motor eléctrico y el carter rotan a una velocidad de 2900 rpm (50hz), lo cual limita el compresor a una única capacidad.

Con la implementación de un variador de frecuencia la velocidad de rotación podría variar desde 1800 a 5400 rpm. La capacidad se controlaría directamente en la alimentación, por lo tanto también se eliminaría temperaturas elevadas. Los ahorros de energía proceden de la no utilización de un compresor sobredimensionado por largos periodos de tiempo.

### **5.3. Sensores a utilizar para la automatización**

Primero mencionaremos los sensores que contiene el actual proceso, los sensores que utiliza el sistema son los siguientes; inmerso en el sistema se encuentra el termostato, el cual tiene la función de comenzar el proceso, a la vez la función de apagar y encender el compresor, cuando la temperatura disminuya, también el proceso contiene un presostato de alta y un presostato de baja presión, estos son los encargados de apagar el compresor al detectar una presión el sistema muy alta o muy baja, estos en realidad solo funcionan en caso de que se tenga una pérdida de presión o una presión en el sistema demasiado alta, no influyen en el proceso directamente.

Para realizar el nuevo control se propone tener otro sensor inmerso en el proceso, el cual puede ser una termocupla o una Ptc100, la cual le servirá al control para llevar la variable mas rápido al setpoint, y el termostato que se encuentra actualmente se utilizara para fijar las diferentes temperaturas que se quieran tener, pero que ya no tenga la función de encender o apagar el proceso

#### **5.4. Diseño de entradas y salidas al Plc**

Para el control a implementar se utilizara una unidad de entradas analógicas al Plc, ya que las señales estándares a utilizar serán analógicas de 4-20 ma o de 0 a 10 V dc; además el modulo se utilizara a la vez para las salidas que van conectadas al variador de frecuencia, que es el que va a controlar la variable manipulable.

#### **5.5. Sintonización del PID**

Generalmente se toman en cuenta tres factores importantes para la sintonización de un controlador PID: las características del proceso, la selección de modos de control, y los criterios de desempeño del lazo de control.

Que modo de control a utilizar es una de las consideraciones importantes a la hora de realizar la sintonización; como ya se ha mencionado hay cuatro combinaciones básicas de controladores a utilizar: proporcional, Proporcional integral, proporcional derivativa, y la combinación de los tres es decir un PID:

El control proporcional es uno de los más encontrados por su simplicidad el cual se describe con su ecuación básica  $m = K_c \cdot e$ , donde se muestra su linealidad entre la entrada y la salida, donde m es el control de salida, y e es el error.

El termino  $K_c$  es la sensibilidad del controlador proporcional, que es la en realidad el termino que se utiliza para el ajuste el cual puede ser un perilla ajustable en el proceso de control. La sensibilidad o ganancia es un término de multiplicación, en muchos mecanismos industriales, no es expresada en ganancia si no en términos de banda proporcional (PB), esta es definida como el lapso de valor de entrada que corresponde para llevar o completar el cambio en la salida, generalmente se expresa en porcentaje, su ecuación es la siguiente:  $PB = \frac{100\%}{K_c}$

A la vez puede ser expresado en un rango de valor, observándolo desde un modo practico si el porcentaje de ancho de banda de PB es alto. Le correspondería una respuesta menos sensitiva, para un porcentaje de ancho de banda bajo de PB, corresponde a una respuesta mas sensitiva del controlador proporcional.

El control proporcional tiene una gran desventaja frente a las compensaciones, ya que generalmente presenta una diferencia considerable frente al setpoint y el valor de ajuste, para solucionar esta diferencia se le adhiere una acción de control mas que es la acción integral o acción de reset, es la integración para el signo del valor de error de entrada (e), sobre un periodo de tiempo (dt), el valor de la variable manipulable (V), es cambiado en un momento que es proporcional a la cantidad de error, responde a la duración del error una magnitud y dirección, cuando la variable del controlador es al setpoint, el elemento final de control permanece estacionario, su ecuación seria la siguiente:

$$V = K e^* e + \frac{Kc}{Ti} \int_0^T e^* dt$$

Este tipo de control es más complicado de sintonizar ya que incluye dos ajustes por separado, el cual depende uno del otro. Una ventaja de incluir el control integral con el proporcional es la eliminación del Offset, generalmente hay una disminución de la estabilidad debido a la inclusión del control integral.

La acción proporcional derivativa se añadirá un tiempo al controlador para compensar el retraso en el lazo de control, casi todo circuito tiene un pequeño retraso de tiempo, por ello se utiliza este control, la adición de este control hace mas estable el lazo de control siempre y cuando se sintonice de la manera apropiada, si el lazo es estable la ganancia se mantendrá estable. La ecuación que lo describe es la siguiente:  $V = Kc * e + Kc * Td * \frac{de}{dt}$

La ecuación que describe los tres modos de control sumados es las del PID que es la siguiente:  $V = Kc * e + \frac{Kc}{Ti} \int_0^t e^* dt + Kc * td * \frac{de}{dt}$

Los tres modos de control presentan una rápida respuesta y sin compensación, pero a la vez presentan un ajuste muy complicado ya que hay tres modos que deben sintonizarse y dependen uno del otro, el control PID presenta un excelente control cuando es ajustado correctamente.

Hay cuatro criterios para la sintonización de un lazo de control, su objetivo principal es minimizar el error integral de la derivación para el signo de control de medida hacia el setpoint, los primeros 3 son integrales, mínimo para el cuadrado del error (ISE), la integral mínima de error absoluto (IAE) y la integral mínima para multiplicar el error absoluto por tiempo (ITAE), las ecuaciones que las describen son las siguientes:

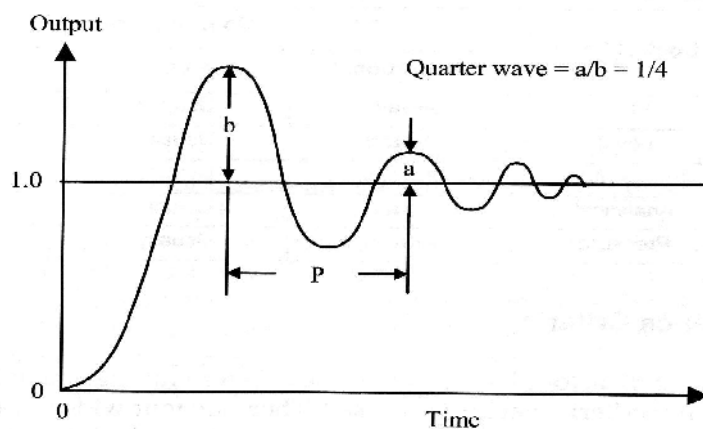
$$ISE = \int_0^{\infty} e^2 dt$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e| dt$$

Estos métodos son los mas adecuados para un control por medio de computadora, ya que dan excelentes resultándooos para la sintonización del lazo de control, el cuarto método y el mas utilizado es el de Ziegler & Nichols un ¼ de decaimiento de la curva, significa que el radio para el primer pico para el proceso de respuesta debe de ser de un ¼ de la primera, el segundo tiene una comparación de 4:1, utiliza un coeficiente de decaimiento de una cuarta parte, representa un compromiso entre una rápida respuesta inicial y un rápido retorno hacia el setpoint.

**Figura 51. Curva de respuesta del proceso de ¼ de decaimiento**



Fuente: Thomas A. Hughes, Measurement and Control Basics, 3rd edición, ISA, pág. 58

El método de sintonización del Zieguel & Nichols, requiere para su uso la determinación de la ultimate gain para el error del lazo de control, la ultimate gain es el valor máximo disponible de ganancia de un controlador que opera con un solo modo proporcional.

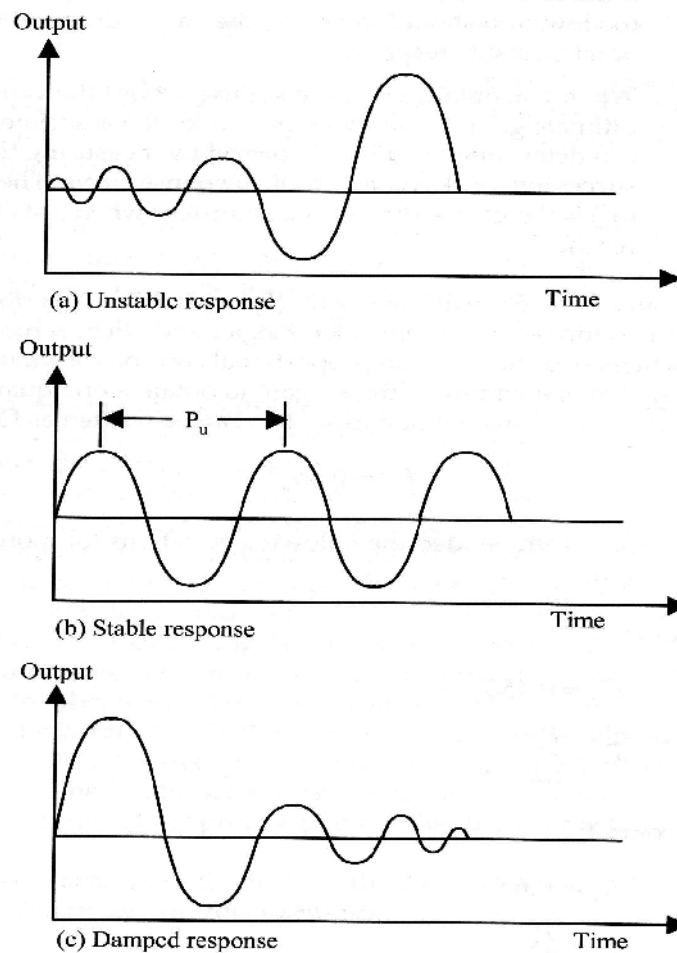
Si se incrementa la ganancia proporcional del lazo este tiende a oscilar, esta es la ganancia máxima en la que el sistema puede operar antes de que se vuelva inestable, a esta se le llama ultimate gain o sensibilidad ( $S_u$ ), el periodo en el que ocurren estas oscilaciones se llama ultimate period ( $P_u$ ), si la ganancia se aumenta en este último punto es sistema se vuelve inestable, para la determinación de estos se tienen los siguientes pasos:

1. Remover el reset y la acción derivativa para el controlador para enviar el tiempo a cero, el tiempo reset hacia infinito o el valor más alto posible, y la ganancia proporcional hacia 1.
2. Colocar el controlador en automático y asegurarse que el lazo este cerrado.
3. Crear un upset en el lazo de control y observar la respuesta del sistema, la forma más sencilla de crear un upset es hacer un pequeño cambio en el punto de ajuste.
4. Si la curva de respuesta del paso 3 no amortigua y es inestable, (figura 51 a), la ganancia es muy alta, se puede disminuir la ganancia y repetir el paso 3, hasta obtener una respuesta estable (figura 51 b).
5. Si la respuesta de la curva en el paso 3 no amortigua afuera (figura 51 c), la ganancia es muy baja, e puede incrementar la ganancia y volver a repetir el paso 3, hasta obtener una respuesta estable.



6. al lograr obtener una respuesta estable, recuerde el valor de la última ganancia y el último período para la respuesta asociada. Se puede determinar el último período midiendo el tiempo entre los sucesivos picos de la curva de respuesta estable; la última ganancia, es la ganancia enviada al controlador cuando se obtiene una respuesta estable.

**Figura 52. Curvas de respuesta del proceso típicas.**



Fuente: Thomas A. Hughes, Measurement and Control Basics, 3rd edición, ISA, pág. 59

Al haber obtenido la ultimate gain ( $S_u$ ), y el ultimate period ( $P_u$ ) se puede utilizar para la configuración del controlador; Ziegler & Nichols recomiendan que para controladores basados solo en el proporcional, el valor de la ganancia debe ser igual a la mitad de la ganancia final para obtener un cuarto de la curva de respuesta, se describe con la ecuación siguiente:  $K_c = 0.5S_u$

Se recomienda utilizar las siguientes ecuaciones para controles más complejos:

PI Control:

$$K_c = 0.45S_u \quad T_i = \frac{P_u}{1.2}$$

PD Control:

$$K_c = 0.6S_u \quad T_d = \frac{P_u}{8}$$

PID Control:

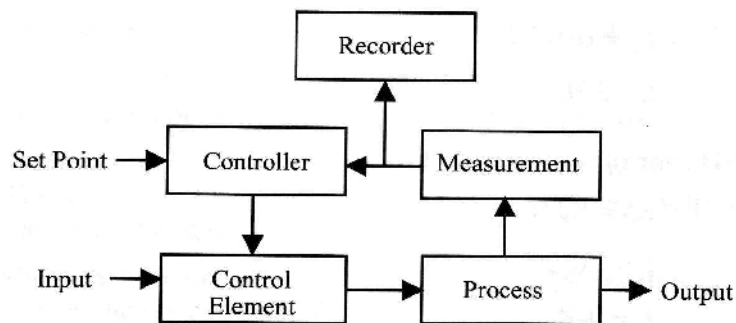
$$K_c = 0.6S_u \quad T_i = 0.5P_u \quad T_d = \frac{P_u}{8}$$

Estas ecuaciones son empíricas su propósito principal es de poder alcanzar el  $\frac{1}{4}$  de decaimiento en la curva de respuesta, lo cual se diría que es un control óptimo.

Otro método propuesto por Ziegler y Nichols para la sintonización de lazos de control se basa en los datos del proceso de la curva de reacción para el sistema bajo control.

El proceso de la curva de reacción es simplemente la reacción del proceso a un cambio en su señal de entrada. Este proceso es la curva de reacción de todos los componentes en el sistema de control (excluido el controlador) a cambio de un paso en el proceso. Es de primer orden con un proceso de retardo de tiempo, que es el proceso más común encontrado en aplicaciones de control

**Figura 53. Proceso de determinación de la curva de reacción**



Fuente: Thomas A. Hughes, Measurement and Control Basics, 3rd edición, ISA, pág. 63

Para obtener un gráfico de proceso de una curva de reacción, colocar una alta velocidad, anotando en el lazo de control, como se muestra en la Figura 53. Para obtener un registro de la curva de reacción, utilice los siguientes pasos

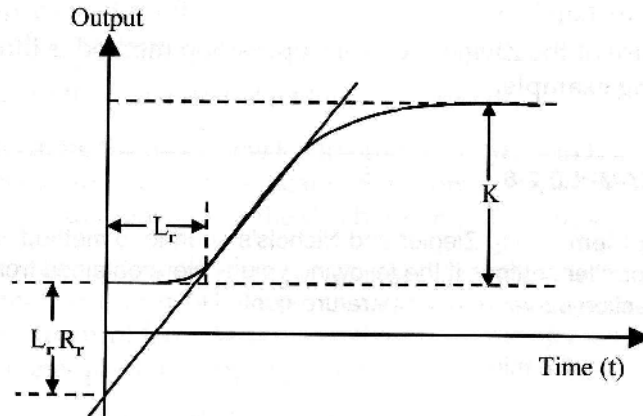
1. Permitir que el sistema de control bajo estudio llegue a un estado de equilibrio.
2. Coloque el controlador de proceso para el sistema en modo manual

3. Ajustar manualmente el controlador de señal de salida para el valor en que se opera automáticamente
4. Espere hasta que el sistema de control llegue a un estado de equilibrio
5. Con el controlador aún en el modo manual, introducir un cambio en el controlador de señal de salida. Normalmente, esto se hace haciendo un pequeño cambio en el controlador de punto de ajuste.
6. Registrar la respuesta de la variable medida.
7. A continuación, devolver el controlador de proceso de la señal de salida a su valor anterior y colocar el controlador en el modo automático.

Una vez que haya completado estos pasos, puede utilizar el proceso de reacción de la curva registrada para calcular los parámetros de sintonización que se necesitan para el proceso del controlador.

Para utilizar el método del proceso de reacción de la curva, sólo debe determinar los parámetros  $R_r$  y  $L_r$ . Un ejemplo de la determinación de estos parámetros para un lazo de control, se ilustra en la Figura 54.

Figura 54. Proceso de la curva de reacción



Fuente: Thomas A. Hughes, Measurement and Control Basics, 3rd edición, ISA, pág. 63

Para obtener los parámetros de proceso de información del método del proceso de reacción de la curva, trazar una tangente a la curva en su punto de máxima pendiente. Esta pendiente,  $R_r$ , que es el proceso de velocidad de reacción.

La intersección de esta tangente con la línea original de referencia da una indicación de  $L_r$ , el proceso de desfase.  $L_r$  es realmente una medida de la cantidad total de tiempo muerto de la válvula de control, la traducción de la medición y el proceso. Si se extrapola esta tangente hacia el punto de máxima pendiente para extraer un eje vertical cuando se impuso el paso, entonces la cantidad por cada cual es debajo de la línea base horizontal que representan el producto  $L_r R_r$ . Usando estos parámetros, Ziegler y Nichols recomiendan utilizar las siguientes ecuaciones para calcular la configuración para un óptimo control:

Solo control proporcional:

$$\frac{1}{s}$$

PID control:

$$\frac{0.9}{s}$$

$$= 3.3$$

PID control:

$$\frac{1}{s}$$

$$= 2$$

$$= 0.5$$

## 5.6. Automatización de cuarto frío

### 5.6.1 Descripción de Hardware a utilizar

A continuación se describirán los componentes propuestos para la automatización de un cuarto frío.

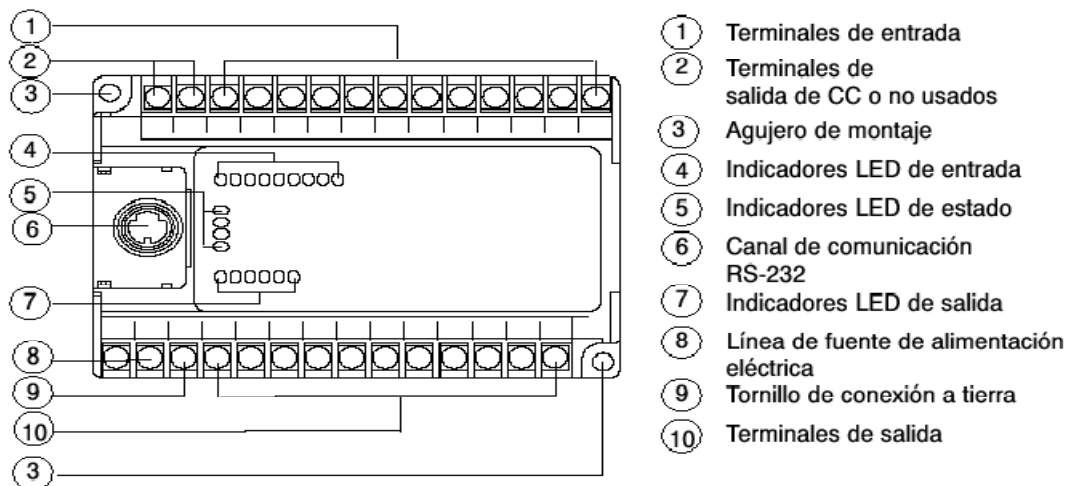
#### 5.6.1.1. Controlador Programable Micrologix 1200

Para la automatización del cuarto frío se propone utilizar un Micrologix 1200, En la figura 55 se puede apreciar el diagrama general de un controlador Micrologix 1200 de manufactura Allen Bradley.

Como es de esperar y de manera similar a todos los controladores programables disponibles en el mercado, consta de una sección de entradas y una de salidas, indicadores LED que proporcionan información acerca del estado de las entradas y salidas. Cuenta con canal de comunicación RS-232 el cual puede ser utilizado tanto para descargar programas, como para transmisión de información en tiempo de ejecución. Y como es lógico cuenta con terminales disponibles para la alimentación eléctrica.

El controlador escogido cuenta con un total de 14 entradas digitales y un total de 10 salidas a relé con capacidad para ser manejadas con diferentes voltajes y en diferentes grupos.

**Figura 55. PLC Micrologix 1200**



Fuente: Controladores Programables Micrologix 1200 & 1500, Publicación 1762-RM001D-ESP, Octubre 2002

### 5.6.1.2. Unidad de entradas y salidas analógicas

Para realizar la automatización se propone utilizar el Módulo de entradas/salidas analógicas 1746-NIO4I; en este módulo se tienen dos entradas analógicas de corriente ó voltaje (seleccionable por medio de un interruptor en el módulo) y dos salidas analógicas de corriente. Las entradas del módulo convierten las señales de entrada analógicas en un valor de 16 bits que se guarda en la memoria del PLC. La siguiente tabla muestra los rangos decimales de la imagen de entrada, el número de bits significantes y la resolución, según el rango de la entrada.

Tabla III. Características del convertidor A/D de los canales de entrada del módulo NIO4I.

Rango de entrada	Rango decimal, imagen de entrada	Número de bits significantes	Resolución
-10 Vdc a 10 Vdc	-32768 a +32767	16	0.305 mV
0 a 10 Vdc	0 a 32768	15	0.305 mV
0 a 5 Vdc	0 a 16384	14	0.305 mV
-20 mA a 20 mA	-16384 a 16384	15	0.00122 mA
0 mA a 20 mA	0 a 16384	14	0.00122 mA

Como ejemplo se puede utilizar la siguiente ecuación para calcular el valor en voltios de la magnitud de la señal de entrada.

$$10 \text{ V} / 32768 * \text{valor de entrada} = \text{voltaje de la señal.}$$

Con *valor de entrada*: valor decimal del dato de 16 bits guardado en la imagen de entrada.



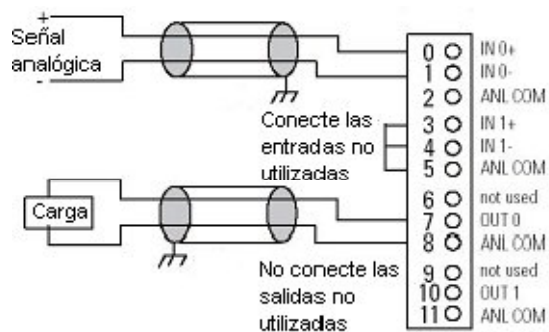
Las salidas son señales analógicas cuantizadas. La siguiente tabla muestra el número decimal equivalente en la imagen de salida, el número de bits significantes y la resolución según el rango de la salida.

**Tabla IV. Características del convertidor D/A de los canales de salida del módulo NIO4I.**

Rango de salida	Rango decimal, imagen de salida	Número de bits significantes	Resolución
0 a 21 mA	0 a 32,764	13 bits	2.56348 $\mu$ A
0 a 20 mA	0 a 31,208	12.92 bits	2.56348 $\mu$ A
4 a 20 mA	6,242 a 31,208	12.6 bits	2.56348 $\mu$ A

La figura siguiente muestra como realizar las conexiones a este modulo

**Figura 56. Conexión de sensores a modulo de entradas analógicas**



Con la siguiente ecuación se puede calcular el valor decimal que debe ser movido a la imagen de salida, para obtener una señal de salida con una magnitud en miliamperios.

$$32768/21\text{mA} * \text{corriente deseada (ma)} = \text{valor decimal a grabar.}$$

Las especificaciones técnicas del módulo son:

- Aislamiento en las entradas de hasta 500 V.
- Tiempo de actualización de valores en entradas y salidas de 512  $\mu$ s.
- Ámbito de entrada -20 a 20 ma/-10 a 10 V.
- Codificación del módulo para la señal de entrada: -32768 a 32767 (decimal).

### **5.6.1.3. Variador de frecuencia**

Para este caso se propone utilizar un variador PowerFlex 70, La familia de variadores PowerFlex 70 permite desarrollar un control flexible en aplicaciones de control de motores en rangos de baja y media tensión. Cuenta con diferentes redes, interface de operador y programación de uso común, lo cual contribuye a facilitar el uso de la aplicación así como a una puesta en marcha más rápida del motor principal. Los variadores PowerFlex 70 tienen un rango de 0.37 KW (0.5 HP) 3,000 KW (4,000 HP).

Este variador tiene una interface de operador. Los módulos de interface de operador (HIM) PowerFlex de LCD muestran información sobre el variador en una pantalla de 7 líneas y 21 caracteres y son compatibles con varios idiomas.

El PowerFlex 70 también ofrece un HIM de LED opcional económico que fue en particular el utilizado en este proyecto. Ofrece una estructura coherente de programación, ubicando parámetros idénticos en lugares idénticos. Todos los variadores de la familia usan los mismos nombres y descripciones de parámetros, lo cual permite reducir así el tiempo de configuración y facilitando la actualización o sustitución de los variadores en los sistemas ya implementados.

Este variador cuenta con una etapa de potencia y una etapa de control. La etapa de potencia se encuentra aislada de la etapa de control y su interacción se da a través de dispositivos IGBT de alta potencia, disparados por el circuito de control a cierto ángulo. La etapa de control detecta el cruce por cero de cada una de las fases de la línea de potencia y dispara los IGBTs dependiendo de la velocidad que se desea o que haya sido programada.

#### **5.6.1.3.1. Programación y parámetros del variador**

El variador de frecuencia cuenta con una serie de parámetros programables, con el fin de controlar la aplicación. Esto significa que el equipo es de aplicación general y debe ser programado a través de una serie de parámetros según el motor que vaya a ser conectado a sus terminales de potencia.

En total son más de 500 parámetros. La programación puede hacerse a través de un módulo HIM, o través de una red de comunicación o PC por el puerto serial.

A través de dichos parámetros es que se configura al equipo para ser comandado desde el PLC y controlar la velocidad de la máquina a través de un potenciómetro. Para configurar el variador a fin de que funcionara de la manera específica requerida, se debieron establecer algunos de los parámetros del variador. Existen tres tipos de parámetros:

**Parámetros ENUM:** Los parámetros ENUM permiten una selección entre 2 o más ítems. El HIM de LCD mostrará un mensaje de texto para cada ítem. El HIM de LED mostrará un número para cada ítem.

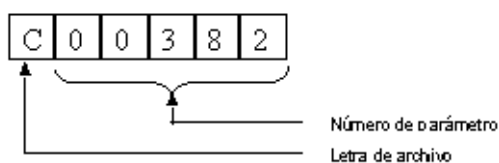
**Parámetros de Bit:** Los parámetros de bit tienen bits individuales asociados con funciones y condiciones. Si el bit es 0, la función está desactivada y la condición es falsa. Si el bit es 1, la función está activada y la condición es verdadera.

#### **Parámetros Numéricos:**

Estos parámetros tienen un solo valor numérico (por ejemplo, 0.1 Voltios).

Los parámetros del variador se subdividen en archivos, los cuales a su vez están divididos en grupos y cada uno tiene un número específico. De manera que al visualizar un parámetro en el módulo de programación se visualiza de la siguiente manera:

**Figura 57. Presentación de los parámetros en pantalla del HIM.**



### 5.6.1.3.2 Modo de programación Him o led

El HIM de LED muestra los parámetros en orden lineal. Se obtiene acceso a los parámetros seleccionando primero la letra de archivo y luego un número de parámetro. Los pasos para editar un parámetro en este modulo se muestran a continuación:

1. Pulsar **Esc** hasta que aparezca la pantalla de frecuencia de salida. Esta pantalla muestra la frecuencia del variador si éste se encuentra funcionando. Si el variador se encuentra detenido, mostrará 0.
2. Pulsar Enter. Aparece entonces el parámetro que se vio la última vez. La letra del archivo parpadeará.
3. Pulsando las flechas Hacia Arriba o Hacia Abajo puede desplazarse por los archivos.
4. Pulsando **Enter** se puede introducir un archivo. El dígito derecho parpadeará.
5. Pulsar las flechas **Hacia Arriba** o **Hacia Abajo** para desplazarse por los parámetros que están en el archivo. Aparece una "n" después de un número si un parámetro es un parámetro de bit dividido en cuartetos de bits.
6. Pulse **Enter** para ver el valor de un parámetro o cuarteto de bits. Se mostrará su valor. Si no desea editar el valor, pulse **Esc** para regresar a la lista de parámetros.

7. Pulse **Enter** para entrar al modo de edición. El dígito derecho parpadeará si se puede editar.
8. Pulse las flechas **Hacia Arriba** o **Hacia Abajo** para cambiar el valor. Si lo desea, pulse **Sel** para moverse de dígito a dígito o de bit a bit. El dígito o bit que puede cambiar parpadeará. A fin de cambiar un signo en un valor con signo, pulse **Sel** para mover el cursor al dígito del extremo izquierdo. Luego pulse las flechas **Hacia Arriba** o **Hacia Abajo** para desplazarse hacia el signo deseado.
9. Pulse **Enter** para guardar el valor. Si desea cancelar un cambio, pulse **Esc**. El valor dejará de parpadear para indicar que usted ya no se encuentra en el modo de edición.
10. Pulse **Esc** para regresar a la lista de parámetros.

#### **5.6.1.3.3. Parámetros a utilizar para la aplicación**

El variador de frecuencia posee una infinidad de parámetros para diferentes aplicaciones, los parámetros a utilizar para la aplicación, se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla V: Parámetros a modificar en variador de frecuencia.**

Archivo	Numero de parámetro	Nombre	Descripción	Valor aproximado de programación
B	041	Motor NP volts	Voltaje en la placa del motor a conectar	Generalmente 220 v
B	042	Motor NP FLA	Corriente a plena carga en la placa del motor	Depende de motor
B	043	Motor NP Hertz	Frecuencia a la que opera el motor según el dato de placa	60 Hz
B	044	Motor NP RPM	Revoluciones por minuto a la gira el motor a la frecuencia nominal	Depende motor
B	045	Motor NP power	Potencia en la placa del motor	Depende motor
C	081	Mínimum Speed	Establece el límite inferior de la referencia de velocidad después de que se ha aplicado el escalamiento	12 Hz
C	082	Máximum Speed	Establece el límite superior de la referencia de velocidad después que se ha aplicado el escalamiento	60 Hz
C	090	Speed Ref A Sel	Seleccionar cual de las entradas disponibles como referencia de velocidad debe ser tomada en cuenta	1: Entrada analogica1
C	091	Speed Ref A Hi	Escala el valor superior de la selección cuando la fuente es una entrada analógica	0 Hz
C	092	Speed Ref A Lo	Escala el valor inferior de la selección cuando la fuente es una entrada analógica	60 Hz
D	140	Accel Time1	Tiempo que debe ejecutarse la aceleración del motor al haber cambio de referencia	1 seg

D	142	Decel Time1	Tiempo en que debe ejecutarse la desaceleración del motor al haber cambio de referencia	1seg
J	322	Lm sup en anlg 1	Establece el valor máximo de entrada al bloque de escalonado de entrada analógica 1.	4.00/20.000 ma
J	323	Lm inf en anlg 1	Establece el valor mínimo de entrada al bloque de escalonado de entrada analógica 1.	4.00/20.000 ma

Fuente: Manual de usuario, PowerFlex 70, 20A-UM001L-ES-P, Variador de frecuencia ajustable de CA, Allen Bradley

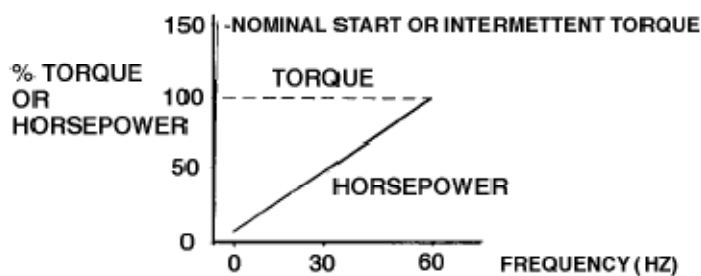
La selección de los límites de frecuencia a utilizar dependerá del tamaño del motor del compresor así de cómo de las dimensiones del cuarto frío, los límites sugeridos para la automatización se obtiene de la observación de la gráfica de par vs frecuencia de un motor de inducción normalizado, la cual muestra la relación que hay entre estas dos variables y además se debe de conocer el tipo de carga que soportara el variador de frecuencia, en nuestro caso se tendrá un tipo de carga constante ya que debe mantener el par a distintas velocidad.

Para el límite inferior de velocidad se propone un 20% de la frecuencia máxima de operación del motor, ya que en el momento de que el compresor no lo necesite este se mantendrá a una velocidad mínima de operación de 12 Hz, con esto se logra que el motor siempre este operando para a una velocidad inferior que nos lleva a tener un ahorro de energía considerable, para el límite máximo de velocidad se propone mantener la frecuencia máxima de operación del motor que será de 60 Hz, al momento de que el compresor necesite la entrada del motor, este podrá hacerlo desde una velocidad mínima sin necesidad de arrancar de cero.



También con esto se logra eliminar el pico de arranque del motor y tener ahorro de energía. En la siguiente grafica se muestra la relación par vs frecuencia para un motor de inducción conectado a una carga de par constante.

**Figura 58. Curva torque vs Frecuencia**



Fuente: AC and DC drive Applications, Control Techniques Worldwide, pág. 13.

## **5.6.2. Descripción del software a utilizar**

A continuación se hará una descripción del software a utilizar, donde se mencionaran las distintas funciones que contiene, más una breve descripción del mismo

### **5.6.2.1. RSLogix 500**

La programación del controlador se realizara mediante el software de desarrollo RSLogix500, que es el programa que se distribuye para este PLC en particular. El software posee la opción de programación en escalera, de manera que este es el más utilizado en la programación.

El software presenta un conjunto de instrucciones, que van desde manejo de bits hasta manejo de archivos de datos completos. Estas instrucciones, cuando se usan en programas de escalera, representan circuitos de lógica cableados usados para el control de una máquina o equipo.

Las instrucciones básicas se dividen en tres grupos: bit, temporizador y contador. También existen los siguientes tipos de instrucción: comparación, matemáticas, manejo de datos, flujo de programa, contador de alta velocidad, comunicación, escalamiento, PID, ASCII, etc.

#### **5.6.2.2. Descripción de funciones a utilizar.**

**Instrucciones de bit:** Estas instrucciones operan en un solo bit de datos. Durante la operación, el procesador puede establecer o restablecer el bit con base en la continuidad lógica de los renglones de escalera. Se puede direccionar un bit las veces que el programa lo necesite.

También, las instrucciones de bit, se conocen como instrucciones tipo relé para monitorear y controlar el estado de los bits en la tabla de datos, tal como los bits de entrada o los bits de palabra de control de temporizadores, contadores y demás.

**Instrucciones de escalamiento:** Se usa este tipo de instrucción para escalar datos desde un módulo analógico y llevarlos dentro de los límites prescritos por una variable de proceso u otro módulo analógico.

Por ejemplo, se podría utilizar este tipo de instrucción para convertir una señal de entrada de 4-20 ma a una variable de proceso PID o para escalar una entrada analógica que controle una salida analógica.

Cuando las condiciones del renglón son verdaderas, esta instrucción multiplica el origen por una proporción especificada, la escala dentro de los límites reescritos y el resultado redondeado se suma a un valor de offset y se coloca en el destino.

**Instrucciones PID:** Esta instrucción de salida se usa para controlar propiedades físicas tales como temperatura, presión, nivel de líquido o velocidad de flujo de los ciclos del proceso.

La instrucción PID normalmente controla un lazo cerrado usando entradas desde un módulo de entradas analógicas y proporcionando una salida a un módulo de salidas analógicas como una respuesta para retener efectivamente una variable del proceso en un punto de referencia determinado.

La ecuación PID controla el proceso enviando una señal de salida al accionador. Cuanto mayor es el error entre el punto de referencia y la entrada de la variable del proceso, mayor es la señal de salida y viceversa.

Se puede añadir un valor adicional (previniendo perturbaciones) a la salida de control como un offset. El resultado del cálculo PID (variable de control) dirigirá a la variable del proceso que se está controlando hacia el punto de referencia.

Las variables del sistema de control en lazo cerrado que son monitoreadas por el controlador son: la variable controlada (VC) y el valor deseado (VD). Así mismo, la salida de controlador (SC) manipulará el actuador del sistema de control.

Esta instrucción necesita de un bloque de 23 palabras de un archivo tipo entero para operar debidamente. Ese bloque contiene los valores de resultados parciales que la instrucción obtiene mientras realiza la operación PID. Además contiene palabras con parámetros del bloque y bits de control.

La modificación de los parámetros del bloque de función puede ser realizada mediante lógica de escalera, o mediante la ventana de parámetros del bloque de función, la cual puede ser desplegada dando doble clic izquierdo en bloque de función.

### **Instrucciones manipulación de datos:**

**MOV:** ésta es una instrucción de salida que mueve el dato de la dirección de fuente a la dirección de destino, si las instrucciones de consulta de su fila son 1.

Los parámetros de este bloque son:

Fuente "source": Aquí debe especificarse la dirección de la palabra que contiene el dato que se quiere mover. También es posible que este parámetro sea una constante.

Destino "Dest": Esta es la dirección donde se moverá el dato.

**MVM:** Esta es una instrucción que mueve un dato de una dirección fuente a una dirección destino y que además permite que el dato sea enmascarado por una palabra separada si las instrucciones de consulta de su fila son 1. Los parámetros de este bloque son:

Fuente "source": Aquí debe especificarse la dirección de la palabra que contiene el dato que se quiere mover. También es posible que este parámetro sea una constante.

Destino "Dest": Esta es la dirección donde se moverá el dato.

### **5.7. Programa del PLC**

Se mencionaran a continuación, las conexiones necesarias, para la implementación del proyecto; las características de la planta son las siguientes:

- Señal de entrada: 4 – 20 ma
- Señal de salida: 4 – 20 ma
- Alimentación de entrada: 120 Vac, 60 Hz

El equipo que se propone utilizar es el siguiente:

<b>Nombre equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Cantidad</b>
Procesador Micrologix 1200	Allen Bradley	1762-L24AWA	1
Módulo de entradas/salidas analógicas	Allen Bradley	1746-NIO41	1
Cable PC-PLC	Allen Bradley		1
Variador de frecuencia Power Flex 70	Allen Bradley	PFLEX-RM001	1

### 5.7.1. Estructura de memoria

La forma en que se estructura la memoria interna del PLC se muestra en la tabla VI donde se especifica la dirección de la variable, el tipo de dato y una breve descripción del uso que se le da en el programa.

**Tabla VI. Estructura de memoria PLC**

Dirección	Tipo de Archivo	Tipo de dato	Descripción
B3:0/0	Bit	Bit	Comprobación de Encendido
B3:0/1	Bit	Bit	Comprobación estado presostato
N10:0	Entero	Entero	Valor temporal de consigna
N10:1	Entero	Entero	Valor temporal de consigna
N7:0-N7:31	Entero	Entero	Bloque de parámetros de función PID
N7:0	Entero	Entero	Variable controlada
N7:31	Entero	Entero	Salida del controlador
I1:0/0	Entrada	Entrada	Imagen de entrada: Variable controlada

O1:0/0	Salida	Salida	Imagen de salida: Hacia VF
I0:0/0	Entrada	Digital	Start
I0:0/1	Entrada	Digital	Stop
I0:0/2	Entrada	Digital	Presostato lado de alta
I0:0/3	Entrada	Digital	Presostato lada de baja

A continuación se describirán los datos de memoria utilizados por la función PID:

**Tabla VII. Direccionamiento de memoria función PID.**

Nombre	Tipo	Descripción	Dirección de memoria PLC	Ámbito
Set point	Entera	Valor deseado	N7:2	1-32767
VC	Entera	Variable controlada	N7:30	1-32767
SC	Entera	Salida a controlador	N7:31	1-32737
T1	Entera	Termino de Restablecimiento	N7:4	1-32737
TD	Entera	Termino de taza de cambio	N7:5	1-32767
KC	Entera	Ganancia de controlador	N7:3	1-32767

### 5.7.2. Programación del PLC mediante aplicación RSlogix

Una vez definido los elementos de memoria a utilizar, se presenta como se programara el PLC mediante la aplicación RSlogix. Primero se debe crear el proyecto; para ello se abre la aplicación Rslogix y cree un nuevo proyecto, en el cuadro de dialogo se seleccionara lo siguiente:

Manipulador "Driver": AB\_DF1-1.  
Nodo del procesador "Processor Node": 1.  
Procesador "Processor": 1762A

En configuración IO seleccione lo siguiente:

Bastidor: 1746-A7.

Procesador: 1762A en la ranura 0.

Módulo de entradas/salidas analógicas: 1746-NIO4I en la ranura 1.

Configuración de comunicación:

Manipulador "Driver": AB\_DF1-1.

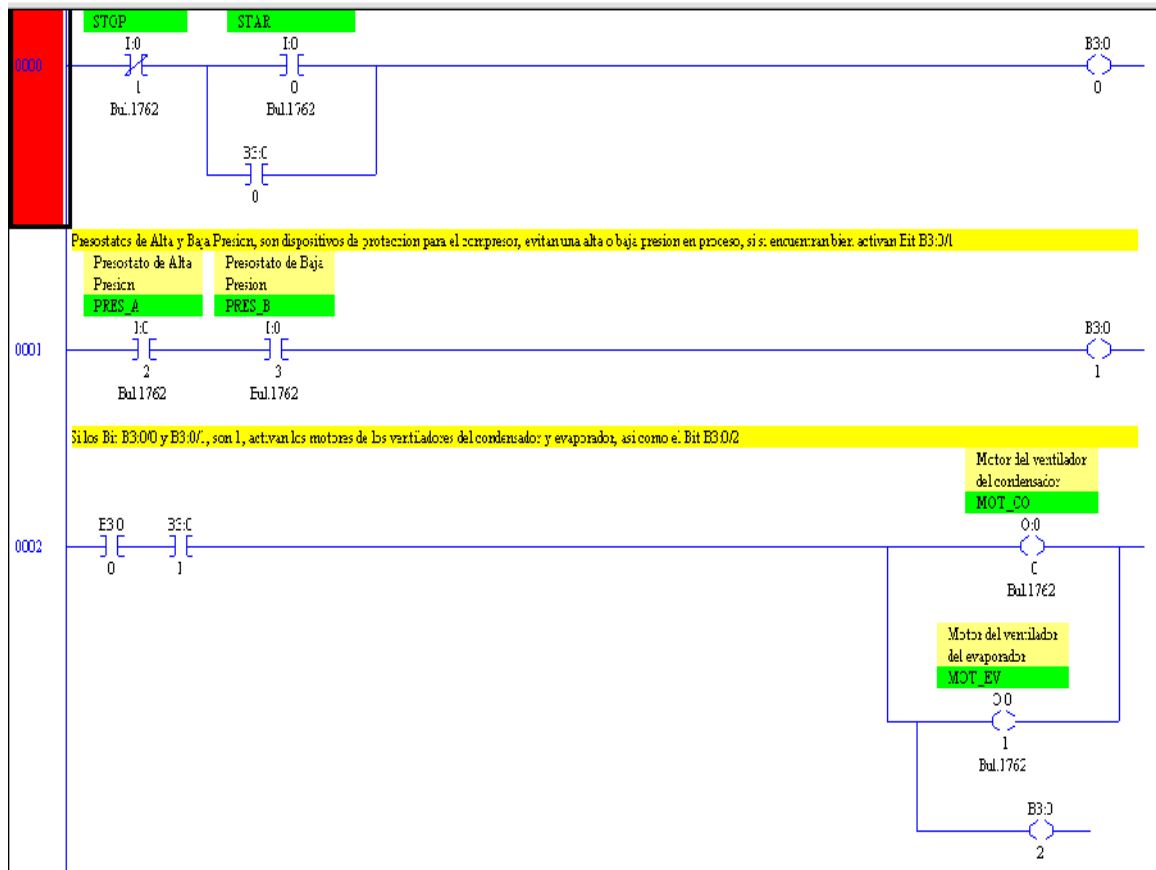
Ruta "Route": local.

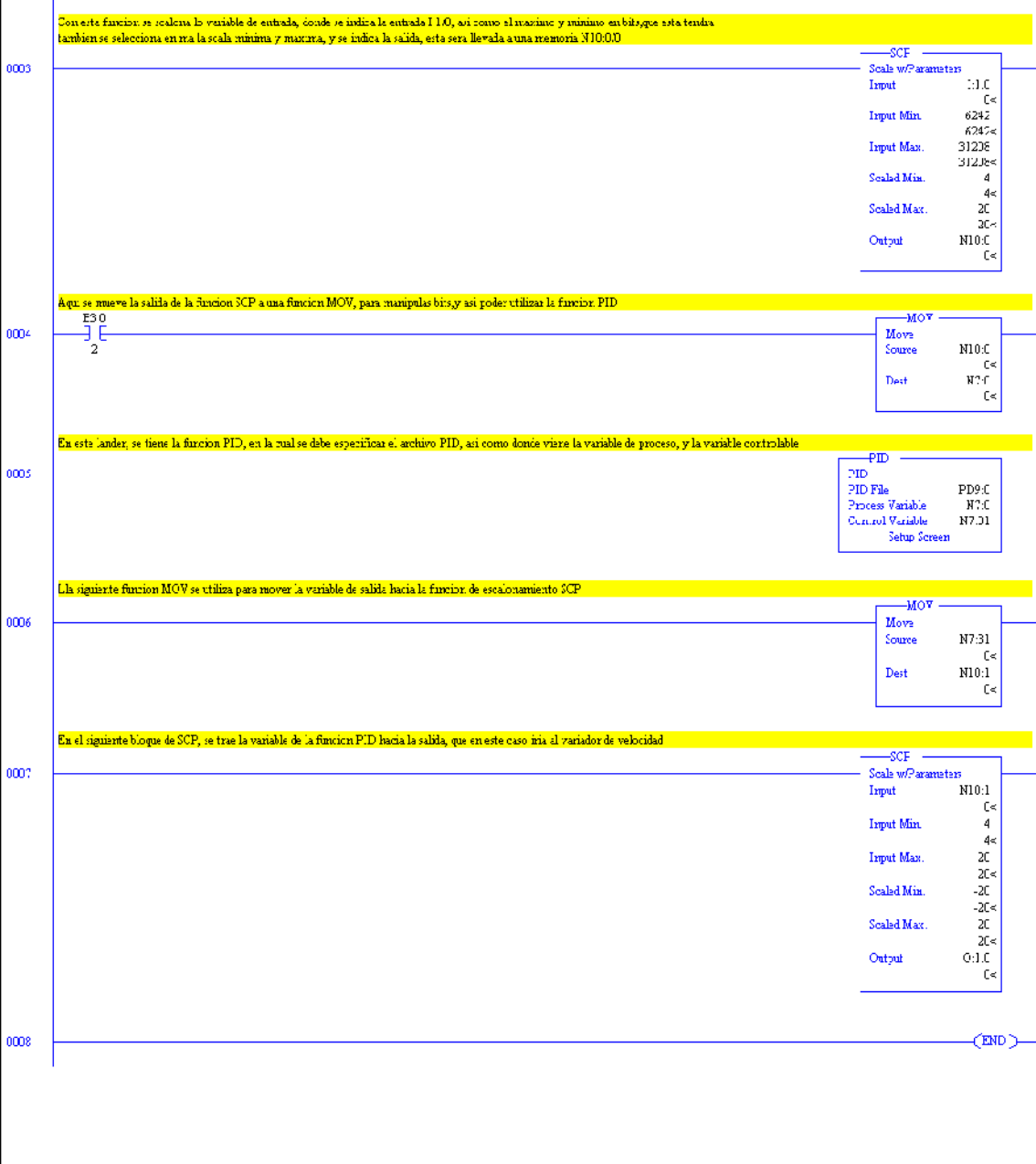
Nodo del procesador: 1.

Ahora se puede escribir el programa del PLC mediante el editor de escalera. La figura 59 muestra el programa que debe escribirse para la implementación de este proyecto.



Figura 59. Programa del Plc.





## **5.8. Ahorro estimado por medio de la automatización**

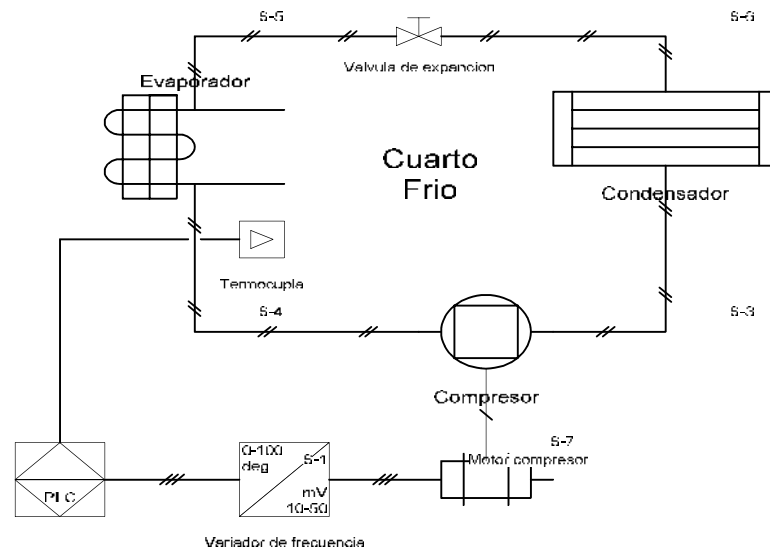
El Ahorro de Energía en el sector Comercial-Industrial se convierte en competitividad, ya que el costo de la energía suele ser uno de los mas significativos en el presupuesto de gastos, por tanto, al reducir este costo se impacta de manera importante el presupuesto anual, traduciendo estos beneficios en mayor rentabilidad del negocio y por consecuencia en una mejor posición respecto de su competencia.

El ahorro de energía que se obtendrá de automatizar un cuarto frío:

1. Vendrá al tomar en cuenta la forma de funcionar de este antes de ser automatizado, en general un cuarto frío es diseñado para condiciones máximas de carga ( para días mas calientes del año), pero en la mayoría de las condiciones de operación se encuentra sobre dimensionado; la mayoría de cuartos fríos vienen para una sola velocidad , no tienen mecanismos para igualar la capacidad de enfriamiento del sistema , se mantienen funcionando a capacidad total hasta que el termostato registra la temperatura programada y apaga el sistema (compresor).
2. El control de la demanda electrica es una oportunidad de ahorro económico muy rentable. Reducir los picos de demanda tiene como consecuencia menores cargos por demanda ya que se reduce la potencia máxima consumida en la instalación y por lo tanto, también se reduce la factura eléctrica.

Con la automatización se lograra tener mayor eficiencia en el sistema, el modelo que se propuesto se describirá con mayor detalle, al tener un mejor control sobre la temperatura, podremos obtener mejor rendimiento de nuestro cuarto frío, el modelo propuesto se muestra en la figura siguiente;

**Figura 60. Modelo propuesto para la automatización.**



El modelo se encuentra compuesto por medio de un Plc y variador de frecuencia acoplados, el ahorro de energía se obtendrá a la hora de realizar el control, el control que se propone es tener una lazo de control feedback, compuesto por un PID, este lazo de control nos ayudará a llevar a nuestra variable manipulable mucho mas rápido al punto deseado, por medio del acoplamiento del variador de frecuencia a nuestro compresor, se podrá regular la cantidad de refrigerante que entra al ciclo.

Al tener la regulación de la temperatura se tendrá un ahorro de energía considerable, este ahorro de energía se obtendrá a la hora de manejar los tiempos de arranque del motor, y en la disminución de la corriente requerida por este ante los cambios de temperatura, ya que cuando ocurra un cambio de temperatura, el lazo de control funcionara llevando nuestra variable lo mas rápido posible al setpoint donde este se mantendrá a una velocidad considerable, dependiendo de lo que el sistema le exige, como beneficio adicional, se logra la reducción de las perturbaciones en las redes de alimentación (picos y huecos de tensión), del esfuerzo mecánico al que se ven sometidos los sistemas de acople (correas, poleas, cojinetes, engranajes y cadenas), y la eliminación de los golpes de presión en los sistemas de bombeo (comúnmente conocido como golpe de ariete).

Otra de las ventajas de la automatización es que permite mantener precisamente la presión de evaporación deseada y temperatura de cuarto frío o proceso manteniendo las fluctuaciones al mínimo. Durante la noche las pérdidas de calor disminuyen, y como el compresor trabaja a bajas velocidades se genera menos ruido. Además, los molestos ruidos del arranque y parada se eliminan.

### **5.8.1 Cálculo del consumo de energía y su costo**

Debido a que la carga de refrigeración Btu/h, en un equipo ya instalado es difícil de determinar; es conveniente primeramente estimar el tiempo promedio diario de operación de un compresor.

Puesto que un equipo comercial se estima en su diseño normalmente con tiempos de operación diario de 16 a 20 horas, por lo tanto el tiempo real de operación diario podrá ser entre 18 a 24 horas.

Después de considerar o estimar el tiempo de operación de un compresor instalado, se debe conocer el costo de la energía eléctrica en la localidad donde se encuentra el compresor. Esta se encuentra regulada por la comisión nacional de energía eléctrica.

Es común que en donde haya instalados compresores, el flujo es controlado generalmente por medio de válvulas de expansión, en estos casos el motor gira a continuamente a velocidad nominal con las consiguientes pérdidas al tener que disminuir el caudal de fluido.

Por medio de la automatización se ofrecerá la ventaja adicional, de poder hacer trabajar al compresor a una velocidad óptima o de mayor rendimiento, en nuestro caso se lograría un ahorro energético ya que el sistema está trabajando de una manera eficiente, y a la vez se evitarían consumos innecesarios de energía. Mediante el siguiente ejemplo, se ilustrará la forma de calcular los costos de operación y de ahorro energético.

Tomaremos por ejemplo un compresor marca Danffos tipo NTZ, aplicación RS404A para bajas temperaturas, modelo NTZ271, las especificaciones técnicas se muestran en la tabla siguiente.

Supongamos que este se encuentra operando 24 horas diarias, durante todo el año, con un costo de energía el cual dependerá de los siguientes factores: Generación y transporte, Distribución, Penalización por incumplimiento a NTSD, tasa municipal e IVA.

**Tabla VIII. Tabla de compresores NTZ, Danffos**

Tipo de compresor	Desplazamiento cm <sup>3</sup> /rev	Desplazamiento		Capacidades nominales*				Número de cilindros	Carga de aceite litros	Peso neto kg
		50 Hz 2900 rpm m <sup>3</sup> /hr	60 Hz 3500 rpm m <sup>3</sup> /hr	400V / 50Hz		460V / 60 Hz				
				Capacidad enfriamiento W	COP W/W	Capacidad enfriamiento W	COP W/W			
NTZ048	48	8.4	10.1	995	1.15	1190	1.13	1	0.95	21
NTZ068	68	11.8	14.3	1515	1.12	1870	1.10	1	0.95	23
NTZ096	96	16.7	20.2	2002	1.15	2395	1.16	2	1.8	35
NTZ108	108	18.7	22.6	2369	1.11	2788	1.10	2	1.8	35
NTZ136	136	23.6	28.5	3225	1.11	3739	1.12	2	1.8	35
NTZ215	215	37.5	45.2	4948	1.19	5886	1.19	4	3.9	62
NTZ271	271	47.3	57.0	6955	1.24	8058	1.21	4	3.9	64

Fuente: Compresores alternativos NTZ, Danffos, R404A/R507A Aplicaciones a bajas temperaturas

Utilizando un compresor de 100hp se tendrá una potencia de:

$$= 100 * 746 = 74.6$$

Se realizará un cálculo de energía para una industria en la cual se encuentran instalado un cuarto frío con una potencia consumida aproximada de 75kw. A continuación se detallara el costo aproximado de energía que tendría esta industria tomando en cuenta solamente el consumo del cuarto frio:

En la siguiente tabla se muestra los costos de energía y potencia para una industria con baja demanda en punta:

**Tabla IX. Costo de energía y potencia para baja tensión con demanda en punta.**

<b>BAJA TENSION Con Demanda en Punta - BTDp</b>	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	188.458548
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)	1.200969
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW-mes)	54.327081
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	76.238356

Fuente: Pliego tarifario EEGSA baja tensión con demanda, CNEE resolución Nov08-Ene09

Calculando el consumo de energía anual que tendría este cuarto frío tomando en cuenta de que este estará funcionando las 24 horas del día, durante todo el año, y un costo de energía de 1.200969 (Q/kwh), se tendría lo siguiente:

$$75 * \frac{h}{24} * \frac{365}{\tilde{n}} * \frac{1.200969}{h} = .789036.633$$

El Consumo de potencia consumida que se tendrá anualmente durante el arranque normal del cuarto frío, tomando en cuenta que es un arranque directo a la red se tendrá un múltiplo de 3, y un costo de potencia máxima de 54.324081 (Q/kw –mes), como un costo de potencia contratada de 76.238356 (Q/kw –mes), el costo seria el siguiente:

$$75 (54.324081 + 76.238356) \text{ — — } * 3 = .29373.75$$

El costo anual de potencia seria de:

$$.29373.75 * 12 = .352485$$



Con la aplicación de la automatización se espera que para un cuarto de medianas proporciones se obtenga un ahorro de energía del 28 % anualmente, en la siguiente tabla se mostrara el ahorro total que se obtendrá a través de la automatización tomando en cuenta el ahorro en energía y en potencia que se tendrá:

**Tabla X. Comparación de ahorro de energía y potencia**

<b>Ahorro de Energía</b>		
Sin Automatización	Con Automatización	Ahorro Anual en Q.
Q. 789036.633	Q. 568106.3758	220930.2572
	*con un 28% de ahorro	
<b>Ahorro en Potencia</b>		
Sin Automatización	Con automatización	Ahorro
Q. 352485	Q. 117506.20	234978.80
Ahorro Anual		Q. 455909.0639

Cálculo de consumo de potencia por automatización:

$$75 \quad (\$54.324081 + 76.238356) \text{ --- } * 12 = .117506.20$$

En la siguiente tabla se muestran los elementos a utilizar en la automatización así como su costo aproximado:

**Tabla XI. Costos de elementos a utilizar en automatización.**

<b>Cantidad</b>	<b>Articulo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio</b>
1	CPU	Micrologix 1500, 12 Entradas,120 VAC, 12 Salidas a Relé	475
1	Modulo de Entradas Analógicas	Entradas 4 1769-IF4	410
1	Cable	Comunicación PC-PLC	200
1	Sensor	Termocupla K	35
1	Software para PLC		1100
1	Variador de Frecuencia	Telemecanique, Variador de velocidad 3F, 200-240 VAC 75 Kw, 100HP	9289.45
<b>Total Q</b>			<b>89773.71</b>

Se tendrá la siguiente tasa de recuperación:

$$h = \frac{89773.71}{455909.0639} = 0.20 \text{ ñ}$$

Reflejando un ahorro anual estimado de costo de energía de Q. 455909.0639, anuales, con ello se podemos decir, que por medio de la automatización del cuarto frio, se reducen la demanda energética, ala vez se alarga la vida del equipo, como la recuperación de la inversión de la automatización.



## CONCLUSIONES

- El funcionamiento de un sistema de refrigeración de un cuarto frío, inicia en la etapa de evaporación, en la cual el refrigerante absorbe calor del espacio que lo rodea y por lo tanto lo enfría, después de evaporarse es succionado por el compresor donde aumenta la presión, este aumento de presión es necesario para que el gas refrigerante cambie fácilmente al estado líquido, donde llega al condensador, aquí el gas refrigerado a alta presión, cede el calor al aire, al agua o a ambos, cambiando de gas a líquido, donde se dirige a la válvula de expansión. Este mecanismo regula el flujo de refrigerante dentro del evaporador, y también actúa como trampa de presión, siendo un proceso sucesivo.

Al observar el funcionamiento de un cuarto frío, se pudo determinar las distintas variables que intervienen en el proceso, siendo estas la presión y la temperatura, tomando la variable de la temperatura como base para la automatización.

- Para realizar la configuración del PLC, se debe de conocer el tipo de señal que se manejara entre el y el variador de frecuencia, para poder tomar la decisión del tipo de modulo que debe utilizar, pudiendo ser del tipo analógico o digital. Siendo el tipo analógico elegido, para poder realizar un manejo de las variables escalonadamente y con una señal estándar de corriente de 4 a 20 ma.

- Las alternativas para poder realizar la automatización son las siguientes: controlar la presión que llega al evaporador para poder regular el flujo de refrigerante que se inyecta al sistema, cambiar de un control on-off a un control continuo para tener mejor manejo de las variables. De las cuales, la alternativa mas viable es la de cambiar el control on-off a un control continuo, con un lazo cerrado del tipo PID, con ello se lograra que el sistema no se apague y encienda, sino que se mantenga siempre regulado por medio del lazo de control PID.
- En base al estudio realizado, se estable que por medio de la automatización del cuarto frío se logra un ahorro de energía anual de Q. 220,930.2572, como también un ahorro en potencia anual de Q. 234,978.80, obteniendo una proyección del ahorro total anual de Q. 455,909.0639, con una inversión del proyecto aproximada de Q. 89,773.41, y con un tiempo de recuperación de 0.20 años, lo que hace que el proyecto se totalmente rentable, y a la vez se obtener un ahorro de energía y potencia.
- Los parámetros mas importantes que se deben programar en el variador de velocidad son: las rampas de aceleración y desaceleración, Potencia nominal del motor, corriente en plena carga del motor, limites de velocidad, referencia de entrada al variador de frecuencia (analógica o digital), escalonamiento de la entrada (4 - 20 ma, 0 - 10 v); la forma mas utilizada para la programación de los parámetros del variador de frecuencia, es por medio de la programación Him ( modulo de interface con el operador), teniendo en cuenta que para la correcta selección del variador se deben conocer antes los datos del motor, y el tipo de comunicación que se tendrá hacia el PLC.

## RECOMENDACIONES

- La rampa de aceleración que se programa en el variador de frecuencia puede ser entre un rango de 1 y 3 seg. La rampa propuesta en el proyecto es de 1 seg. Pero puede cambiar dependiendo del tamaño del cuarto frío.
- El equipo propuesto para la automatización del cuarto frío, es adecuado para un cuarto de mediano tamaño, para su implementación en un cuarto frío de grandes dimensiones, se propone realizar los estudios correspondientes para dimensionar los equipos adecuadamente.
- Los sensores propuestos para la medición de las variables de proceso, en el proyecto pueden ser remplazados, por otros de diferentes rangos de medición dependiendo del tamaño del cuarto frío.
- Es necesario el adiestramiento de personal, para la operación correcta del mismo para obtener su mayor eficiencia, así como de las posibles contingencias que se puedan tener.
- La automatización que se propone realizar puede ejecutarse de otras maneras, pudiendo ser una de ellas por medio solo del variador de frecuencia agregándole a este un sensor inmerso en el proceso y realizando la programación de un lazo de control PID, para que el sistema opere de la manera correcta.



## BIBLIOGRAFIA

1. Allen-Bradley, **Adjustable Frequency AC Drive Reference Manual**, Publicación PFLEX-RM001C-EN-E, Milwaukee, E.U, Diciembre 2001.
2. Allen-Bradley, **Bulletin 1761-6.3ES, MicroLogix™ 1000 Programmable Controllers™ 1000, Users Manual**, Publicación 1761-6.3, Milwaukee, E.U, Diciembre 1995.
3. Allen-Bradley, **Bulletin 1761-L32AWA MicroLogix™ 1000 Programmable Controllers Installation Instruction**, Publicación 1761-IN001B-MU-P, Milwaukee, E.U., Mayo 2002.
4. Allen Bradley, **Digital I/O Modules**, Publicación 1746-IN005B-EN-P, Estados Unidos, 2002, 75 pp.
5. Allen-Bradley, **Adjustable Frequency AC Drive Reference Manual**, Publicación PFLEX-RM001C-EN-E, Milwaukee, E.U., Diciembre 2001, 384 pp.
6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica, Normas técnicas del servicio de distribución, Guatemala: s.e. 1999.
7. Chapman Stephen, **Máquinas eléctricas**, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000.
8. Empresa Eléctrica de Guatemala. **Normas para acometidas de servicio eléctrico**, 12ª ed. Guatemala: s.e. 1998.
9. Hugdes, Thomas A., **Measurement and Control Basics**, 3<sup>rd</sup> Edition, ISA The Instrumentation Systems and Automation Society, United States of America, 2002.



10. Jennings, Burgués H. **Aire acondicionado y refrigeración**, decimoquinta impresión, México, Compañía editorial continental, S.A de C.V., octubre 1989.
11. Kuo, Benjamín C, **Sistemas de control automático**, Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1996, 250 pp.
12. Noriega Guzzardi David José, **Consideraciones para el diseño de cuartos refrigerados para alta y baja temperatura**, trabajo de graduación ingeniería mecánica Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniera' octubre 1999, 165 pp.
13. Ogata, Karsuhiko, **Ingeniería de control moderna**, 4ta edición, Pearson Educación, S.A., España, 2003, 350 pp.
14. Pita Edward G, **Principios y sistemas de refrigeración**, Editorial Limusa, México, 1992, 497 pp.
15. Polka David, **Motor & Drives**, ISA the Instrumentation Systems, and Automation Society, United States of America, 2003, 370 pp.
16. Smith Corripio, **Control Automático de Procesos**, Segunda Reimpresión, México, Editorial Limusa, S.A de C.V Grupo Noriega Editores, 1995, 245 pp.
17. Wade Harold L, **Basic and Advanced Regulatory control: System Design and Application**, 2<sup>nd</sup> Edition, ISA The Instrumentation Systems, and Automation Society, United States of America, 2004, 372 pp.