



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

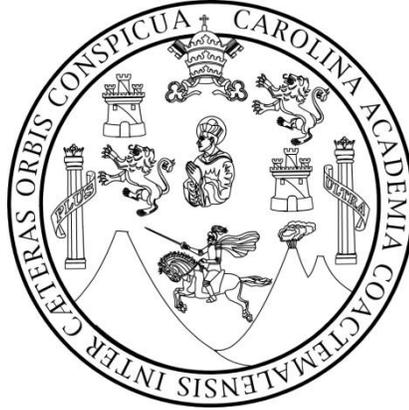
AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA AHORRO DE ENERGÍA

Leonel Baudilio Leal de la Cruz

Asesorado por el Ing. Otto Fernando Andrino González

Guatemala, enero de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE
AIRE COMPRIMIDO PARA AHORRO DE ENERGÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LEONEL BAUDILIO LEAL DE LA CRUZ

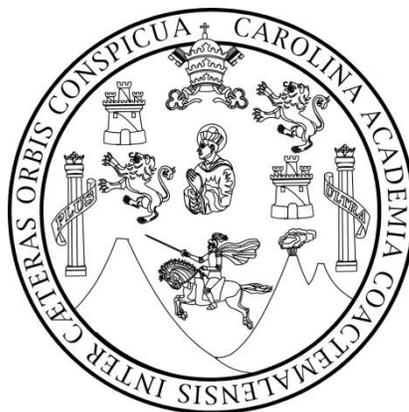
ASESORADO POR EL ING. OTTO FERNANDO ANDRINO
GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ENERO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NOMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios
EXAMINADOR	Ing. Carlos Fernando Rodas
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz 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 DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA AHORRO DE ENERGÍA

Tema que me fue asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 7 de mayo de 2008.

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a light blue oval. The signature is stylized and appears to read 'L. Baudilio Leal de la Cruz'.

Leonel Baudilio Leal de la Cruz

Guatemala 29 de octubre de 2010

Ing. Romeo López
Coordinador Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-

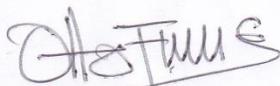
Ingeniero López:

Atentamente me permito informarle que he finalizado la revisión del trabajo de graduación titulado: AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA AHORRO DE ENERGÍA, desarrollado por el estudiante Leonel Baudilio Leal de la Cruz, con número de carné: 200212133. Por lo que puedo concluir que dicho trabajo cumple con los preceptos y normas académicas de nuestra casa de estudio.

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

Deferentemente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



M.B.A. Ing. Otto Fernando Andrino González
No. Colegiado 4,038
Asesor.



Ref. EIME 47. 2010
Guatemala, 16 de noviembre 2010.

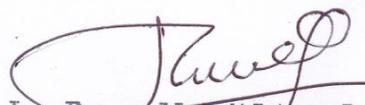
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO
PARA AHORRO DE ENERGÍA,** del estudiante, **LEONEL
BAUDILIO LEAL DE LA CRUZ,** que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Romeo Neftali López Orozco
Coordinador de Electrotécnica

RNLO/sro



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

REF. EIME 02. 2011.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; LEONEL BAUDILIO LEAL DE LA CRUZ titulado: AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA AHORRO DE ENERGÍA , procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puentes Romero

GUATEMALA, 13 DE ENERO 2,011.





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA AHORRO DE ENERGÍA**, presentado por el estudiante universitario **Leonel Baudilio Leal de la Cruz**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 18 de enero de 2011.



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

- JEHOVA DIOS** El Creador del universo y la tierra, dador de vida, que me brindado fortaleza y la ayuda necesaria a lo largo de mi carrera y de la vida.
- MIS PADRES** Leonel Eduardo Leal Martínez y Gloria del Carmen de la Cruz de Leal, con mucho cariño por ese gran amor que tienen hacia mí y todo el agradecimiento posible por el apoyo incondicional que me han brindado en todo momento.
- MIS HERMANOS** Rocio del Carmen, Edgar Fernando y Faviola Lucrecia, por estar siempre pendientes de mí darme ánimo, escucharme y alentarme.
- MI FAMILIA** Por ayudarme a crecer y estar siempre animándome a seguir adelante.
- MI ESPOSA** Wendy Elizabeth Gramajo Pineda por creer siempre en mí, por darme fortaleza para culminar mi carrera.
- MIS AMIGOS** A todas las personas que me han permitido ser un amigo, los que me acompañaron durante la carrera brindándome su amistad y todos los amigos que han acompañado durante el recorrido de mi vida que de alguna forma me han apoyado.

ACTO QUE DEDICO A:

Con cariño, admiración y respeto:

Mis padres: Leonel Eduardo Leal Martínez
Gloria del Carmen de la Cruz de Leal.

Mis hermanos: Rocio del Carmen, Edgar Fernando y Fabiola Lucrecia
Leal de la Cruz.

Mi esposa: Wendy Elizabeth Gramajo Pineda.

Y a todos mis familiares y amigos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTADO DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1 AIRE COMPRIMIDO	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Aire	2
1.2.1 Propiedades físicas del aire	4
1.2.2 El aire como gas ideal	4
1.2.3 Leyes de los gases	5
1.3 Aire comprimido	7
1.3.1 Aplicación del aire comprimido	7
1.3.2 Propiedades del aire comprimido	9
1.4 Presión	11
1.4.1 Propiedades de la presión	13
1.4.2 Velocidad de circulación	14
1.5 Material de tuberías	14
1.5.1 Tuberías principales	14
1.5.2 Derivaciones hacia receptores	15
1.5.3 Uniones	16
1.6 Compresores	18
1.6.1 Tipos de compresores	18

1.6.2	Compresores de aire a pistón	18
1.6.3	Compresores rotativos	27
1.7	Depósito de aire	44
1.7.1	Capacidad	46
2	COSTO DE LA ENERGÍA	49
2.1	Parámetros a controlar en energía eléctrica	50
2.1.1	Factor potencia	50
2.1.2	Demanda (KW)	51
2.1.3	Energía (KWH)	51
2.2	Mediciones	52
2.2.1	Energía	52
2.2.2	Factor potencia	54
2.2.3	Demanda	55
2.3	Tarifas eléctricas	56
2.3.1	Cargos por demanda máxima	57
2.3.2	Cargos por energía consumida	57
2.3.3	Caros por bajo factor de potencia	57
2.4	Estructura de las tarifas	58
2.4.1	Tipos de tarifas	58
2.5	Normas de facturación por el proveedor de energía	61
2.5.1	Potencia contratada	61
2.5.2	Demanda máxima	62
2.5.3	Factor de carga	62
2.5.4	Factor de potencia	63
2.5.5	Otros cargos	64
2.5.6	Costo actual de la energía eléctrica	65

3	AUTOMATIZACIÓN Y VARIABLES DE FRECUENCIA	67
3.1	Automatización	67
3.1.1	La parte operativa	68
3.1.2	La parte de mando	70
3.1.3	Objetivo de la automatización	72
3.2	Sensores y transductores	73
3.2.1	Características generales de los sensores	75
3.2.2	Tipos de sensores y transductores de presión	80
3.3	Motores de inducción	90
3.3.1	Producción del campo magnético rotativo	91
3.3.2	Deslizamiento de la máquina de inducción	93
3.3.3	Circuito equivalente de la máquina de inducción	94
3.3.4	Circuito equivalente final	98
3.3.5	Características por velocidad del motor	99
3.3.6	Clases de diseño de motores de inducción	102
3.3.7	Tendencias en el diseño de motores de inducción	104
3.3.8	Dos técnicas de control de velocidad	105
3.4	Variador de frecuencia	113
3.4.1	Tipos de variadores electro electrónicos	115
3.4.2	Tipos de variadores AC de frecuencia ajustable	120
3.4.3	Controlador del VFD	123
3.5	Métodos para llevar a cabo la variación voltaje/frecuencia	125
3.5.1	Por medio de tristores	126
3.5.2	Control de voltaje y frecuencia mediante modulación de ancho de pulso	129
3.6	Inversores para control de velocidad de motores de inducción mediante V/F	132
3.6.1	Puente inversor monofásico modulado por PWM	133
3.6.2	PWM cuadrado y puente inversor trifásico	135

3.6.3	Puente inversor trifásico	138
3.6.4	PWM senoidal	140
3.6.5	Control digital de un inversor PWM	143
4	PARAMETROS DE UN SISTEMA DE CONTROL	147
4.1	Sistemas de control	147
4.2	Diferencia entre control manual y control automático	150
4.3	Variables de proceso	151
4.4	Clasificación de los sistemas de control	152
4.4.1	Sistema de control de lazo abierto	153
4.4.2	Sistema de control de lazo cerrado	154
4.4.3	Sistemas de control con lazo cerrado en comparación con los sistemas de lazo abierto	157
4.5	Descripción del lazo de control	158
4.5.1	Control feedback	158
4.5.2	Control en cascada	161
4.5.3	Control feedforward	163
4.6	Tipos de acciones de control	164
4.6.1	Acción de dos posiciones	164
4.6.2	Acción temporizada de dos posiciones	164
4.6.3	Acción flotante	165
4.6.4	Acción proporcional (P)	165
4.6.5	Acción proporcional integral (PI)	166
4.6.6	Acción proporcional derivativa (PD)	157
4.7	Control proporcional integral derivativo	168
4.8	Variables de control	169
4.8.1	El lazo de control retroalimentado	170
4.8.2	Medición	171

4.8.3	Control	171
4.8.4	Suministro	171
4.8.5	Variable controlada	172
4.8.6	Variable manipulada	172
4.9	La presión como variable de control	173
4.9.1	Relación entre presión y demanda de aire	174
4.9.2	Punto de medición de la presión	175
4.9.3	Transductores piezoresistivos	176
4.10	Estrategias de control de carga de compresores	178
5	AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO	181
5.1	Sistema de aire comprimido	181
5.1.1	Proceso de trabajo de un sistema de aire comprimido	181
5.1.2	Propuesta para el control de un sistema de aire comprimido	182
5.2	Variables influyentes en la automatización de un sistema de aire comprimido	183
5.2.1	Variable manipulable	184
5.2.2	Variable controlable	186
5.3	Sensores a utilizar para la automatización	188
5.4	Sintonización de PID	189
5.4.1	Control proporcional	189
5.4.2	Control proporcional integral (PI)	190
5.4.3	Control proporcional derivativo (PD)	191
5.4.4	Control proporcional integral derivativo (PID)	192
5.4.5	Sintonización del lazo de control	192
5.5	Automatización de un sistema de aire comprimido	200
5.5.1	Estructura básica de un PLC	200

5.5.2	Descripción del hardware a utilizar	203
5.5.3	Variador de frecuencia	211
5.6	Descripción del software a utilizar	218
5.6.1	Requisitos mínimos del sistema	218
5.6.2	Rslogix 500	219
5.6.3	Descripción general del software	219
5.6.4	Descripción de funciones a utilizar	225
5.6.5	Instrucciones para la manipulación de datos	228
5.7	Programa del PLC en RSLogix 500	229
5.7.1	Programa en escalera	230
5.7.2	Descripción del los bloques del programa	232
5.8	Estimación del ahorro de energía	233
5.8.1	Costo de la energía	234
5.8.2	Cálculo del consumo de energía	239
	CONCLUSIONES	249
	RECOMENDACIONES	253
	BIBLIOGRAFÍA	255

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

FIGURAS

1	Racores de anillo cortante	16
2	Racor con anillo de sujeción	17
3	Racor con borde recalcado	17
4	Racor especial con reborde	17
5	Formas de trabajar el pistón	21
6	Formas de montaje de los pistones	22
7	Sección de un compresor estacionario	24
8	Principio de funcionamiento de los compresores rotativos de paletas	28
9	Sección longitudinal de un compresor de paletas	29
10	Diagrama PV de un compresor de paletas	30
11	Diagramas PV deformados conforme se altera la presión	32
12	Se muestran los dos rotores paralelos de tipo tornillo con perfil asimétrico	34
13	Diagrama funcional del compresor de tornillo	35
14	Compresor de tornillo de dos etapas	37
15	Esquema de los circuitos de aire y aceite	38
16	Compresor Root. A) Juego entre rotores. B) Rotor motriz	42
17	Triángulo de potencias	55
18	Esquema de transductor diferencial	81
19	Transductor resistivo	82
20	Puente de Wheatstone	83
21	Esquema full duplex de galgas	84
22	Transductor magnético de inductancia variable	85

23	Transductores magnéticos de reluctancia variable	86
24	Transductores capacitivos	87
25	Distribución senoinal del campo magnético rotatorio	92
26	Modelo transformador de un motor de inducción con el rotor y estator conectados por un transformador ideal de relación de vueltas a_{eff} .	95
27	Circuito modelo del rotor	97
28	Circuito modelo del rotor con todos los efectos de la frecuencia (deslizamiento) concentrados en la resistencia R_R	98
29	Circuito equivalente por fase en un motor de inducción	99
30	Curva característica típica de un motor de inducción	100
31	Curva característica par-velocidad de un motor de inducción	101
32	Curvas características típicas para diferentes diseños de motores	102
33	Relación <u>par-velocidad</u> para un variador de velocidad	115
34	Forma de onda de voltaje y corriente del VVI	121
35	Forma de onda de voltaje y corriente del CSI	122
36	Forma de onda de voltaje y corriente del PWM	123
37	Diagrama variador de frecuencia con modulación de ancho de pulso	124
38	Control de frecuencia de un motor de corriente alterna	127
39	Modulación por ancho de pulso sinusoidal	130
40	Modulación de ancho de pulso sinusoidal unidireccional	131
41	Puente inversor monofásico	134
42	Ondas de salida para el puente inversor monofásico	134
43	Ondas se salida PWM cuadrada del inversor	136
44	Puente inversor trifásico	137
45	Voltaje de salida para un inversor trifásico controlado por PWM cuadrado	139
46	Ondas de voltaje para un inversor trifásico controlado por PWM	143

	senoidal	
47	Ondas de voltaje para un inversor trifásico controlado por PWM senoidal	145
48	Sistema de control	148
49	Lazo cerrado de control	154
50	Lazo de control	158
51	Sistema de control a lazo cerrado	159
52	Sistema de control de lazo cerrado reducido	160
53	Diagrama de control en cascada	162
54	Acción proporcional derivativa PID	168
55	Sistema de control de presupuesto	183
56	Curva de respuesta del proceso de $\frac{1}{4}$ de decaimiento	193
57	Curvas de respuesta del proceso típicas	196
58	Proceso de la curva de reacción	199
59	Alambrado del módulo de entradas/salidas analógicas	209
60	Presentación de los parámetros en pantalla del HIM	213
61	Relación par vs frecuencia para un motor de inducción conectado a una carga de par constante	217
62	Vista principal de RSLogix 500	220
63	Árbol de proyecto de RSLogix 500	222
64	Carpeta data files	223
65	Instrucción XIC	225
66	Instrucción XIO	226
67	Instrucción OTE	226
68	Programa en escalera	231

TABLAS

I	Compuestos del aire atmosférico	2
II	Categorías de tarifas	59
III	Justificación de los otros cargos que encontramos en una factura de servicio de suministro de energía eléctrica	64
IV	Pliegos tarifarios EEGSA	66
V	PLC micrologix 1200	204
VI	Características del convertidor A/D de los canales de entrada del módulo NIO4I	208
VII	Características del convertidor D/A de los canales de salida del módulo NIO4I.	209
VIII	Técnicas de módulo de entradas y salidas analógicas del módulo NIO4I	210
IX	Parámetros del variador de frecuencia	215
X	Direcciones utilizadas en la estructura de la memoria del PLC	229
XI	Direcciones utilizadas en la memoria de la función PI	230
XII	Pliego tarifario EGSSA, de baja tensión con demanda en punta	235
XIII	Límites de velocidad variables para compresores 06TR de baja temperatura	237
XIV	Límites de velocidad variables para compresores 06TR de alta temperatura	238
XV	Resumen del cálculo potencia del motor	240
XVI	Resumen del cálculo, energía consumida al año	241
XVII	Resumen del cálculo de energía consumida al año con el sistema automatizado	243
XVIII	Resumen del cálculo, energía consumida por arranque al año	244
XIX	Resumen de costo de potencia y energía	245
XX	Comparación de ahorro de energía y potencia en quetzales	246
XXI	Inversión en la automatización	246

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AMM	Administrador del mercado mayorista
Ar	Argón
CV	Caballo de vapor
Hp	Caballos de fuerza
CNEE	Comisión nacional de energía eléctrica
R_u	Constante universal de los gases ideales
I	Corriente
AC	Corriente alterna
CO ₂	Dióxido de carbono
AFD	Drivers de frecuencia ajustable o variadores de frecuencia
f.p	Factor de potencia
f	Frecuencia

g/cm ³	Gramos por centímetro cubico, unidad de medida de presión
He	Helio
Hz	Hertz
H	Hidrógeno
KVA	Kilo volt-amper. Unidad de medida de la potencia aparente
KW	Kilo Watts Unidad de medida de la potencia Real
KWh	Kilovatios hora, unidad en la que se mide la demanda
σ	Letra griega nombrada sigma, es utilizada para identificar el estiramiento relativo de la galga
PSI	Libra por pulgada cuadrada
CH ₄	Metano
m/s	Metros por segundo
mA	mili-amperios
mV	mili-voltios
PWM	Modulación de ancho de pulso
Ne	Neón
N	Nitrógeno

NCC	Norma de coordinación comercial del administrador del mercado mayorista
p	Número de polos
N ₂ O	Óxido nitroso
O	Oxígeno
Pa	Pascales, unidades de medida de presión
P	Potencia activa
S	Potencia aparente
Q	Potencia reactiva
P	Presión
R	Resistencia
RPM	Revoluciones por minuto
H ₂ O	Vapor de agua
VFD	Variador de frecuencia
VVVF	Variador de voltaje variador de frecuencia
V	Voltaje
Xe	Xenón

GLOSARIO

Actuadores	Elementos electromecánicos externos al autómata que ejecutan las órdenes dadas por él y que se conectan a las tarjetas de salida.
Autómata programable PLC	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.
Automatización	Uso de sistemas o elementos computarizados para controlar maquinarias y/o procesos industriales sustituyendo a operadores humanos.
Capacitancia	Parámetro del capacitor que indica la capacidad de almacenamiento de carga que éste tiene y su unidad es el faradio.
Compresor	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).

Corriente alterna	Corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente. La forma de onda de la corriente alterna más comúnmente utilizada es la de una onda senoidal.
Demanda	Potencia en kilovatios promediada en un intervalo de tiempo estipulado, normalmente cada quince minutos, es un término que indica la potencia media.
Demanda máxima	Valor más alto de demanda registrado por los demandómetros y es el valor que se tomará de referencia para la facturación del proveedor de energía eléctrica.
Electroválvula	Elemento de control que abre o cierra el paso de un fluido accionado por la excitación eléctrica de una bobina.
Estator	Parte fija de un motor dentro de la cual gira el rotor o eje.
Impedancia	Oposición que presenta un componente o sistema al paso de corriente alterna.
Kilovatio	Unidad de medida del trabajo efectuado por unidad de tiempo es equivalente a mil vatios.
Kilovatio hora	Expresión del trabajo como el producto de potencia y tiempo, unidad de medida de energía, que equivale

al trabajo desarrollado por una potencia de un kilovatio en una hora.

KVA Dimensional de la potencia eléctrica aparente dada en voltios-amperios y con exponente número 3.

KVAR Dimensional de la potencia eléctrica reactiva dada en voltios-amperios-resistencia y con exponente número 3.

Motor eléctrico Máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas.

Neumática Disciplina que trata los procesos y aplicaciones de aire comprimido para realizar trabajos mecánicos y de control.

Par Fuerza desarrollada por un motor durante la rotación.

Potencia Cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo.

Potencia activa Potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en trabajo.

Potencia aparente De un circuito eléctrico de corriente alterna, es la suma (vectorial) de la energía que disipa dicho circuito en cierto tiempo en forma de calor o trabajo y la energía utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes que

fluctuará entre estos componentes y la fuente de energía.

Potencia reactiva

Esta potencia no tiene tampoco el carácter realmente de ser consumida y solo aparecerá cuando existan bobinas o condensadores en los circuitos. La potencia reactiva tiene un valor medio nulo, por lo que no produce trabajo útil. Por ello se dice que es una potencia devastada (no produce vatios), se mide en voltamperios reactivos (VAR) y se designa con la letra Q.

Potencia contratada

Potencia establecida de un mutuo acuerdo entre un proveedor de energía eléctrica y un usuario, y es la cantidad de potencia que el proveedor tiene la obligación de tener disponible en cualquier momento para ser consumida por el usuario.

Presión

Magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie y sirve para caracterizar una determinada fuerza resultante sobre una superficie.

Presostato

También conocido como interruptor de presión. Es un aparato que cierra o abre un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión de un fluido.

Rectificador

Elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua.

Retroalimentación

Modo de control que se basa en tomar mediciones de la variable controlada continuamente y tomar

estas mediciones para envíasalas al PLC, para que este compare el valor de la variable controlada con el set point, y tome decisiones para actuar sobre la variable manipulada, en sistemas de control este término también se le conoce como feedback.

Rotor	Componente que gira (rota) en una máquina eléctrica, sea ésta un motor o un generador eléctrico.
Señal analógica	Tipo de señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético y que es representable por una función matemática continua en la que es variable su amplitud y periodo (representando un dato de información) en función del tiempo.
Sensor	Dispositivo capaz de medir magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.
Set Point	Valor deseado al que queremos mantener la variable controlada.
Sistema de control	Conjunto de componentes que regulan el comportamiento de un sistema (o de sí mismos) para lograr un objetivo.
Software	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.

Transductor	Elemento que transforma un elemento físico en señal eléctrica, convierte algún tipo de energía en una señal eléctrica.
Transformador	Máquina eléctrica que permite aumentar o disminuir el voltaje o tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia.
Variable controlada	Variable que influye significativamente en el funcionamiento de un proceso, y es sobre esta variable que toma acciones un sistema de control.
Variable manipulada	Variable sobre la cual estaremos tomando acciones para mantener la variable controlada lo más cerca posible del set point.

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta una opción de ahorrar energía en la neumática, que utiliza el aire comprimido como fluido. El aire comprimido se refiere a una tecnología o aplicación técnica que hace uso de aire que ha sido sometido a presión por medio de un compresor, que aspira aire a la presión atmosférica y lo comprime a una presión más elevada. El compresor recibe el movimiento de un motor eléctrico que varía su capacidad según la demanda de la planta. Un sistema de aire comprimido está conformado por: Sistema compresor, refrigerador del compresor y motor, filtros de aire, filtros separadores de aceite, filtros para agua y partículas, post-enfriador, tanque almacenador, sistema de condensado y secado de aire, redes, herramientas, máquinas, motores neumáticos o uso directo, controles, elementos de medición y válvulas de seguridad.

Los motores eléctricos son los mayores consumidores de electricidad en la industria y en el comercio. Casi la mitad de la energía eléctrica usada y cerca de las dos terceras partes de la utilizada en la industria es consumida por motores eléctricos.

El sistema actual en el que se basa el presente trabajo tiene un funcionamiento tipo carga/descarga que mantiene trabajando continuamente el compresor a velocidad constante, dejándolo sin carga cuando la presión de descarga alcanza el valor requerido. Es importante tomar en cuenta el consumo

de potencia en vacío debido a que sigue consumiendo energía innecesaria en este estado, 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.

El control se realiza a través de un autómata (PLC), el cual se encarga de obtener los datos del sensor de presión, procesar los mismos por medio de un sistema de lazo cerrado con un control PI y tomar las acciones pertinentes para el control de la variable presión que se estará monitoreando constantemente. La información procesada en el PLC saldrá directamente hacia el variador de velocidad.

Por medio de la variación de velocidad del motor, los compresores con velocidad variable, pueden suministrar la cantidad de aire inmediatamente solicitada a la utilización, dentro de los límites de velocidad programados por el proyecto del fabricante. De esa manera, el consumo de energía vuelve directamente proporcional a la utilización del aire comprimido. Entonces, el funcionamiento a velocidad variable será sin duda más ventajoso que en el caso de aplicaciones donde el consumo de aire es muy variable.

OBJETIVOS

General

Automatizar el sistema de control de una planta de aire comprimido para ahorrar energía.

Específicos

1. Analizar el funcionamiento de un sistema de aire comprimido actual.
2. Definir la terminología y principios que se usan para determinar las características de un sistema de producción de aire comprimido.
3. Definir las características de capacidad y eficiencia del sistema de producción de aire comprimido.
4. Describir como se cuantifica la energía eléctrica consumida por el sistema de producción de aire comprimido.
5. Analizar las mejores alternativas para la automatización del sistema de aire comprimido.
6. Determinar el ahorro en energía que se puede obtener con la automatización en un sistema de aire comprimido.

INTRODUCCIÓN

El aire comprimido es utilizado ampliamente en la industria, desde los pequeños talleres de maquinado hasta los grandes complejos industriales. En muchos casos, el aire comprimido es indispensable al grado que la planta no puede operar sin él. Los sistemas de aire comprimido pueden variar ampliamente en tamaño.

En muchas plantas industriales los compresores de aire son los mayores consumidores de electricidad, y por tanto, las ineficiencias en el sistema de aire comprimido resultan muy costosas. Sin embargo, el personal que utiliza el aire comprimido tiende a pensar que el mismo tiene poco valor; y así, por pensar que se trata de simple aire, por la prácticamente nula peligrosidad de un escape o fuga, es muy frecuente que no se le preste atención a su ahorro y uso adecuado.

El mejoramiento de la eficiencia energética en estos sistemas puede permitir una reducción del 20 al 50 % del consumo de electricidad de los mismos, lo cual puede significar miles o cientos de miles de quetzales de ahorros potenciales anuales. Un sistema de aire comprimido bien operado ahorra energía, reduce el mantenimiento, disminuye las interrupciones productivas, incrementa la productividad y mejora la calidad.

En consecuencia es necesario encontrar un método de reducción del consumo de energía de las máquinas, con el fin de reducir los costos para evitar que éstas se eleven demasiado y lograr la reducción de la demanda eléctrica de la instalación.

En el presente trabajo de graduación se trabaja una automatización de sistema de aire comprimido. Para ello es necesario conocer el funcionamiento del sistema actual. Se debe profundizar en las características de operación para 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 de la planta no sufra cambios.

1. AIRE COMPRIMIDO

El aire comprimido es una de las formas de energía más antiguas que conoce y aprovecha el hombre para reforzar sus recursos físicos. El descubrimiento consciente del aire como medio que nos rodea se remonta a muchos siglos atrás, lo mismo que un trabajo más o menos consciente con dicho medio.

1.1. Antecedentes.

Las características básicas de la neumática se cuentan entre los más antiguos conocimientos de la humanidad, no fue sino hasta el siglo pasado cuando empezó a investigarse sistemáticamente su comportamiento y sus reglas. Desde aproximadamente 1950, se puede hablar de una verdadera aplicación industrial de la neumática en los procesos de fabricación.

A pesar de que esta técnica fue rechazada en un inicio, debido en la mayoría de los casos a falta de conocimiento y de formación, fueron ampliándose los diversos sectores de aplicación.

En la actualidad, ya no se concibe una moderna explotación industrial sin el aire comprimido. Este es el motivo por el cual en los ramos industriales más variados se utilizan aparatos neumáticos cuya

alimentación continua y adecuada de aire garantizará el exitoso y eficiente desempeño de los procesos involucrados en la producción.

El diseño y mantenimiento adecuado de redes de aire comprimido y sus respectivos accesorios, juega un papel decisivo en los procesos productivos involucrados cuya energía utilizada es el aire.

1.2. Aire

Se denomina aire a la mezcla de gases que forma la atmósfera terrestre, sujetos alrededor de la Tierra por la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta, es particularmente delicado y está compuesto en proporciones ligeramente variables. El aire limpio y puro forma una capa de aproximadamente 500 000 millones de toneladas que rodea la Tierra, su composición es la siguiente

Tabla No. I
Compuestos del aire atmosférico

Componente		Concentración aproximada
1. Nitrógeno	(N)	78.03% en volumen
2. Oxígeno	(O)	20.99% en volumen
3. Dióxido de carbono	(CO ₂)	0.03% en volumen
4. Argón	(Ar)	0.94% en volumen
5. Neón	(Ne)	0.00123% en volumen
6. Helio	(He)	0.0004% en volumen

7. Criptón	(Kr)	0.00005% en volumen
8. Xenón	(Xe)	0.000006% en volumen
9. Hidrógeno	(H)	0.01% en volumen
10. Metano	(CH ₄)	0.0002% en volumen
11. Óxido nitroso	(N ₂ O)	0.00005% en volumen
12. Vapor de agua	(H ₂ O)	Variable
13. Ozono	(O ₃)	Variable
14. Partículas		Variable

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos/aire/aire.shtml> Pág. 3

En el sector industrial, el aire es utilizado a diferentes niveles de presión y temperatura, requiriendo equipamientos para su purificación, compresión y control de temperatura.

El aire, como todo gas, si lo encerramos en un recipiente tiende a expandirse, hasta llenar completamente el recipiente que lo contiene. Si este recipiente se abre, el aire tiende a seguir expandiéndose y escapa del contenedor, de igual forma si el volumen de este recipiente lo hacemos disminuir el gas ocupara un volumen más pequeño aumentando su presión interna, a esta propiedad se le conoce como compresibilidad.

La compresibilidad es una propiedad de la materia a la cual se debe que todos los cuerpos disminuyan de volumen al someterlos a una presión o compresión determinada manteniendo constantes otros parámetros.

1.2.1 Propiedades físicas del aire.

A continuación se presentan características propias del aire para el manejo del mismo.

- a. Expansión: aumento de volumen de una masa de aire al verse reducida la presión ejercida por una fuerza o debido a la incorporación de calor.
- b. Contracción: reducción de volumen del aire al verse presionado por una fuerza, pero este llega a un límite y el aire tiende a expandirse después de ese límite.
- c. Fluidez: es el flujo de aire de un lugar de mayor a menor concentración sin gasto de energía.
- d. Presión atmosférica: fuerza que ejerce el aire a todos los cuerpos.
- e. Volumen: es el espacio que ocupa el aire.
- f. Densidad: es de $1.18 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$
- g. Propiedades de la mezcla Psicrometría.

1.2.2 El aire como gas ideal

El estado gaseoso es un estado disperso de la materia, es decir, que las moléculas del gas están separadas unas de otras por una distancia mucho mayor que el tamaño real de las moléculas. El volumen que ocupa el gas depende entonces de la presión y la

temperatura a la que está sometido y del número de moles que conforman el gas.

El aire cumple con las propiedades necesarias para que su comportamiento pueda considerarse como el de un gas ideal, a continuación se presentan esas características:

- a. El aire se adapta a la forma y el volumen del depósito que lo contiene, al cambiar el contenedor el aire se comprime o se expande de manera que ocupa todo el volumen y toma la forma de su contenedor.
- b. Se deja comprimir fácilmente, ya que al existir grandes espacios entre sus moléculas estas pueden acercarse unas a otras reduciendo su volumen cuando aplicamos presión, a lo cual se le llama compresión de aire.
- c. El aire se difunde con facilidad, al no existir fuerza de atracción intermolecular en sus partículas, se esparce de manera espontánea.
- d. El aire también se dilata, y la energía cinética promedio de sus moléculas es directamente proporcional a la temperatura aplicada

1.2.3 Leyes de los gases.

Ley de Avogadro: establece la relación entre la cantidad de gas y su volumen cuando se mantienen constantes la temperatura y la

presión. La ley establece que el volumen es directamente proporcional a la cantidad de gas que se encuentra en un recipiente.

Ley de Boyle: establece que la presión de un gas en un recipiente cerrado es inversamente proporcional al volumen del recipiente, cuando la temperatura es constante.

Ley de Charles: descubrió que a presión constante, el volumen de una masa dada de gas varía directamente con la temperatura absoluta.

Ley de Gay-Lussac: establece que a volumen constante, la presión de un gas es directamente proporcional a la temperatura

Ley de combinada de los gases: a partir de las leyes anteriormente descritas podemos llegar a la ley de los gases, que podemos conocer la forma como cambia el volumen, la presión o la temperatura cuando conocemos el calor del estado inicial de las tres variables y el valor de dos de las tres variables en el estado final.

Ecuaciones de Estado: si se combinan adecuadamente las leyes de Boyle y Charles con el principio de Avogadro, se puede obtener una expresión que relaciona simultáneamente el volumen de

determinada cantidad de un gas con la presión y la temperatura del mismo.

$$PV = nR_u T$$

Donde R_u se conoce como la constante universal de los gases ideales y su valor depende de las unidades en que se expresen los valores de las diferentes variables, se tiene $R_u = 8.314472 \text{ [J/(mol*K)]}$ y n es el número de moles del gas.

1.3. Aire Comprimido

El aire comprimido se refiere a una tecnología o aplicación técnica que hace uso del aire que ha sido sometido a presión por medio de un compresor. En la mayoría de aplicaciones, el aire no sólo se comprime sino que también se desintegra y se filtra. El uso del aire comprimido es muy común en la industria, su uso tiene la ventaja sobre los sistemas hidráulicos de ser más rápido, aunque es menos preciso en el posicionamiento de los mecanismos y no permite fuerzas grandes.

1.3.1. Aplicaciones del aire comprimido:

El aire comprimido tiene un campo múltiple, ya que se aplica prácticamente en todas las ramas de la industria. De acuerdo a su aplicación se puede clasificar así:

a. Servicio de potencia:

Son aplicaciones en las cuales el aire es usado para mover alguna cosa o para ejercer una fuerza. Ejemplos: herramientas neumática, equipos de arte, elevación de materiales así como trasportadores neumáticos.

b. ***Servicio de proceso:***

....Son aplicaciones dentro de las cuales el aire se encuentra dentro del proceso, Ejemplos: combustión, hidrogenación de aceites, etc.

En algunas industrias el aire comprimido puede estar limitado a servicio de potencia solamente, sin embargo, otras solo pueden usar el aire en servicio de proceso, pero en muchas aplicaciones el aire comprimido es usado en ambos servicios dentro de una sola planta industrial.

El aire comprimido es importante en las industrias de bienes ligeros o productos de consumo, así como también en el procesamiento empaque de los mismos. Toca una parte importante en transportación, edificación, construcción, servicio y mantenimiento de toda industria. A continuación se presenta un resumen de aire comprimido en nuestro medio y para las cuales ha tenido éxito en su aplicación: aviación, barcos, campos petrolíferos, embotelladoras, construcción, edificios y hoteles, explotación de piedra, ferrocarriles, fábrica de pintura, papel, latas,

productos plásticos, jabones, ingenios azucareros, manejo de ácidos, minerías, plantas de leche, químicos, enlatadoras de cemento, de vidriería, textiles, talleres automotrices, talleres de maquinado, etc.

El resumen anterior muestra solamente algunas importantes aplicaciones del aire comprimido, existiendo además, aplicaciones en casi cualquier tipo de industria.

1.3.2. Propiedades del aire comprimido

Causará asombro el hecho de que la neumática se haya podido expandir en tan corto tiempo y con tanta rapidez. Esto se debe, entre otras cosas, a que en la solución de algunos problemas de automatización no puede disponerse de otro medio que sea más simple y más económico.

Las propiedades del aire comprimido que han contribuido a su popularidad son:

- a. Abundante: está disponible para su compresión prácticamente en todo el mundo, en cantidades ilimitadas.
- b. Transporte: el aire comprimido puede ser fácilmente transportado por tuberías, incluso a grandes distancias. No es necesario disponer tuberías de retorno.

- c. Almacenable: no es preciso que un compresor permanezca continuamente en servicio. El aire comprimido puede almacenarse en depósitos y tomarse de éstos. Además, se puede transportar en recipientes (botellas).
- d. Antideflagrante: no existe ningún riesgo de explosión ni incendio; por lo tanto, no es necesario disponer instalaciones antideflagrantes, que son caras.
- e. Limpio: el aire comprimido es limpio, en caso de faltas de estanqueidad en elementos, no produce ningún ensuciamiento. Esto es importante, por ejemplo, en las industrias alimenticias, de la madera, textiles y del cuero.
- f. Constitución de los elementos: la concepción de los elementos de trabajo es simple, por lo tanto, precio económico.
- g. Velocidad: es un medio de trabajo muy rápido, por eso, permite obtener velocidades de trabajo muy elevadas. (La velocidad de trabajo de cilindros neumáticos pueden regularse sin escalones.)
- h. A prueba de sobrecargas: las herramientas y elementos de trabajo neumáticos pueden hasta su parada completa sin riesgo alguno de sobrecargas.

Para delimitar el campo de utilización de la neumática es preciso conocer también las propiedades adversas:

- a) Preparación: el aire comprimido debe ser preparado, antes de su utilización. Es preciso eliminar impurezas y humedad (al objeto de evitar un desgaste prematuro de los componentes).
- b) Compresible: con aire comprimido no es posible obtener para los émbolos velocidades uniformes y constantes.
- c) Fuerza: el aire comprimido es económico sólo hasta cierta fuerza. Condicionado por la presión de servicio normalmente usual de 700

kPa (7 bar), el límite, también en función de la carrera y la velocidad, es de 20.000 a 30.000 N (2000 a 3000 kp).

- d) Escape: el escape de aire produce ruido. No obstante, este problema ya se ha resuelto en gran parte, gracias al desarrollo de materiales insonorizantes.
- e) Costos: el aire comprimido es una fuente de energía relativamente cara; este elevado costo se compensa en su mayor parte por los elementos de precio económico y el buen rendimiento (cadencias elevadas).

Para producir aire comprimido se utilizan compresores que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. Los mecanismos y mandos neumáticos se alimentan desde una estación central. Entonces no es necesario calcular ni proyectar la transformación de la energía para cada uno de los consumidores. El aire comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías.

1.4. Presión:

En física y disciplinas afines la presión es una magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie, y sirve para caracterizar como se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.

Cuando sobre una superficie plana de área A se aplica una fuerza normal F de manera uniforme y perpendicular a la superficie la presión P viene dada por: $P = F/A$

La presión es uno de los parámetros que definen un sistema de aire comprimido, es el parámetro que normalmente medimos en los puntos de producción, distribución y uso.

En el sistema internacional de unidades la presión se mide en una unidad derivada que se denomina pascal (Pa) que es equivalente a una fuerza total de un newton actuando uniformemente en un metro cuadrado. En los sistemas de aire más comúnmente utilizados en el área nacional, la unidad de medida usada para la presión es la libra por pulgada cuadrada (PSI).

Es común también que los equipos que normalmente utilizamos vienen diseñados para rangos de presión definidos en libras por pulgada cuadrada, incluso es más utilizada la unidad PSI que las unidades del SI, el pascal, u otras unidades.

La presión está íntimamente relacionada con la fuerza de trabajo que puede ejercer el aire comprimido al ser liberado, esto es aplicación directa en la superficie de trabajo de un elemento cilindro pistón por ejemplo. Además de la ley de gases ideales nosotros sabemos que la presión y el peso específico del aire están relacionados con la fuerza de trabajo que puede ejercer el aire comprimido al ser liberado dependiendo de la cantidad de aire que esta fluyendo y la temperatura de trabajo.

1.4.1 Propiedades de la presión

- a. La presión en un punto de un fluido en reposo es igual en todas las direcciones (principio de Pascal).
- b. La presión en todos los puntos situados en un mismo plano horizontal en el seno de un fluido en reposo (y situado en un campo gravitatorio constante) es la misma.
- c. En un fluido en reposo la fuerza de contacto que ejerce en el interior del fluido una parte de este sobre la otra es normal a la superficie de contacto
- d. La fuerza asociada a la presión en un fluido ordinario en reposo se dirige siempre hacia el exterior del fluido, por lo que debido al principio de acción reacción, resulta en una compresión para el fluido, jamás una tracción.
- e. La superficie libre de un líquido en reposo (y situado en un campo gravitatorio constante) es siempre horizontal. Eso es cierto sólo en la superficie de la Tierra y a simple vista, debido a la acción de la gravedad no es constante. Si no hay acciones gravitatorias, la superficie de un fluido es esférica y, por tanto, no horizontal.
- f. En los fluidos en reposo, un punto cualquiera de una masa líquida está sometida a una presión en función únicamente de la

profundidad a la que se encuentra el punto. Otro punto a la misma profundidad, tendrá la misma presión. A la superficie imaginaria que pasa por ambos puntos se llama superficie equipotencial de presión o superficie isobárica

1.4.2 Velocidad de circulación.

El caudal de aire comprimido es una magnitud que se determina según la necesidad. La velocidad de circulación y la caída de presión se hallan en relación directa, porque cuando mayor es la velocidad de circulación, mayor es la de caída de presión hasta el punto que toma de la tubería. La velocidad de circulación puede estar comprendida entre 6 a 10 m/s, debiéndose utilizar un valor por debajo de los 10m/s, para así compensar los aumentos de velocidad producidos en algunas estrangulaciones y por la demanda de grandes consumidores.

1.5 Material de tuberías

1.5.1 Tuberías principales

Para la elección de los materiales brutos, tenemos diversas posibilidades:

- a. Cobre tubo de acero negro
- b. Latón tubo de acero galvanizado

c. Acero fino plástico

Las tuberías deben poderse desarmar fácilmente, ser resistentes a la corrosión y de precio módico.

Las tuberías que se instalen de modo permanente se montan preferentemente con uniones soldadas. Estas tuberías así unidas son estancadas y, además de precio económico. El inconveniente de estas uniones consiste en que al soldar se producen cascarillas que deben retirarse de las tuberías. De la costura de soldadura se desprenden también fragmentos de oxidación; por eso, es necesario incorporar una unidad de mantenimiento.

En las tuberías de acero galvanizado, los empalmes de rosca no siempre son totalmente herméticos. La resistencia a la corrosión de estas tuberías de acero no es mucho mejor que la del tubo negro. Los lugares desnudos (roscas) también se oxidan, por lo que también en este caso es importante emplear unidades de mantenimiento. Para casos especiales se montan tuberías de cobre o plástico.

1.5.2 Derivaciones hacia los receptores

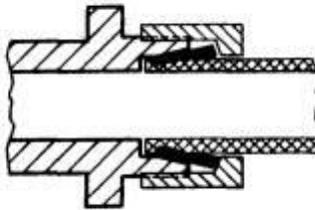
Los tubos flexibles de goma solamente han de emplearse en aquellos casos en que se exija una flexibilidad en la tubería y no sea posible instalar tuberías de plástico por los esfuerzos mecánicos

existentes. Son más caros y no son tan manipulables como las tuberías de plástico. Las tuberías de polietileno y poliamida se utilizan cada vez más en la actualidad para unir equipos de maquinaria. Con racores rápidos se pueden tender de forma rápida, sencilla y económica.

1.5.3 Uniones

Se describirán los dispositivos de uso común en neumática basándonos básicamente en los modelos Festo.

Figura No. 1
Racores de anillo cortante.

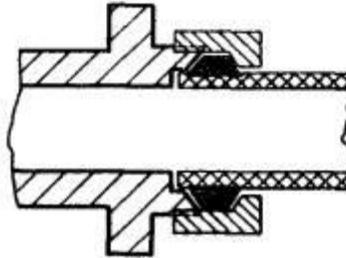


Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica4.htm> Pág. 40

El empalme puede soltarse y unirse varias veces.

Figura No.2

Racor con anillo de sujeción

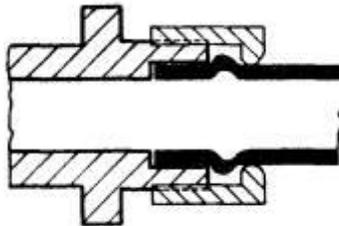


Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica4.htm>. Pág. 67

Para tubos de acero y cobre, con anillo interior especial también para tubos de plástico.

Figura 3

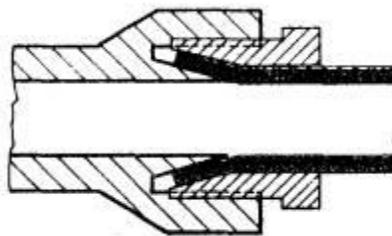
Racor con borde recalcado



Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica4.htm> . 68

Figura 4

Racor especial con reborde



Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica4.htm>. Pág. 68

1.6 Compresores

Los compresores son máquinas que tienen por finalidad aportar una energía a los fluidos compresibles (gases y vapores) sobre los que operan, para hacerlos fluir aumentando al mismo tiempo su presión.

1.6.1 Tipos de compresores

Según las exigencias referentes a la presión de trabajo y al caudal de suministro, se pueden emplear diversos tipos de construcción. Se distinguen dos tipos básicos de compresores. El primero trabaja según el principio de desplazamiento. La compresión se obtiene por la admisión del aire en un recinto hermético, donde se reduce luego el volumen. Se utiliza en el compresor de émbolo (oscilante o rotativo).

El otro trabaja según el principio de la dinámica de los fluidos. El aire es aspirado por un lado y comprimido como consecuencia de la aceleración de la masa (turbina).

1.6.2 Compresores de aire a pistón.

En una relación concisa, podemos resumir la gama de compresores a pistón conocidos en el mercado atendiendo al

repertorio de caudales que se disponen y al rendimiento del mismo en CV necesarios para comprimir $1m^3/min$. A 7 bars de presión efectiva.

Para un mejor entendimiento del asunto, los compresores alternativos de pistón pueden clasificarse según el número de etapas y por el modo de trabajar el pistón, así tenemos:

1.6.2.1 Por el número de etapas

Los compresores pueden organizarse, atendiendo al estilo de actuar la compresión de una o de dos etapas.

- a. *Compresores de una etapa:* estos compresores disponen de una simple etapa de compresión. Se componen, en esencia, de un cárter con cigüeña, pistón y cilindro. Para su refrigeración lleva, en la parte exterior, aletas que evacuan el calor por radiación son utilizados para aplicaciones en donde el caudal sea limitado y en condiciones de servicio intermitente, pues son compresores de pequeña potencia.

- b. *Compresores de dos etapas:* son compresores que tienen como característica principal que el aire es comprimido en dos etapas. En la primera etapa (de baja presión) se comprime hasta una $P = 2$ a 3 bars, y en la segunda etapa (de alta presión), se comprime hasta una presión de 8 bars. Estos compresores

son los más empleados en la industria cubriendo sus caudales en extensísima gama de necesidades.

Pueden ser refrigerados por aire o por agua, es decir, el refrigerador intermedio (entre etapas) puede actuar a base de un ventilador o en virtud de una corriente de agua a través del mismo.

1.6.2.2 Por el modo de trabajar el pistón.

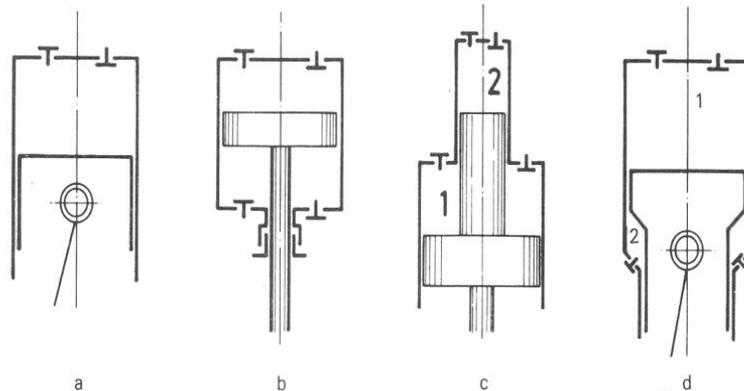
Se dice que un pistón es de simple efecto cuando trabaja sobre una sola cara del mismo y precisamente aquella dirigida hacia la cabeza del cilindro. La cantidad de aire desplazado es igual a la carrera por la sección del pistón.

El pistón de doble efecto cuando trabaja sobre sus dos caras y delimita dos cámaras de compresión en el cilindro. Así, el volumen engendrado es igual a dos veces el producto de la sección del pistón por la carrera. Hay que tener en cuenta el vástago, que ocupa un espacio obviamente no disponible para el aire, y, como consecuencia, los volúmenes creados por las dos caras del pistón no son iguales.

Se dice que el pistón es de etapas múltiples si tiene elementos superpuestos de diámetros diferentes, que se desplazan en cilindros concéntricos (Figura No. 5). El pistón de mayor diámetro puede trabajar es simple o doble efecto, no así los otros pistones, que lo harán en simple efecto. Esta

disposición es muy utilizada por los compresores de alta presión.

Figura No.5
Formas de trabajar el pistón.



Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones.** (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.), Pág.58

1.6.2.3 Por el número y disposición de los cilindros

En los compresores de cilindros, o a pistón, los fabricantes acostumbran a utilizar diversas formas de montaje para éstos, siendo las más frecuentes las siguientes, que se detallan en la figura No.6: 1) disposición vertical, 2) horizontal, 3) en L o en ángulo (90°) y 4) de dos cilindros opuestos, debiendo también incluir la colocación en V muy adoptada para los compresores pequeños.

Los compresores verticales sólo se utilizan para potencias bastantes pequeñas, ya que los efectos de machaqueo relativamente importantes producidos por esta disposición

conducen al empleo de fundaciones bastante pesadas y voluminosas, en contraposición de las disposiciones horizontales o en ángulo, las cuales presentan cualidades de equilibrio tales que el volumen de las fundaciones se reduce muchísimo.

Para compresores pequeños, la forma en V es la más empleada. Para compresores grandes de doble efecto, se recurre al formato en L o en ángulo, con el cilindro de baja presión vertical y el de alta presión horizontal.

Figura No.6
Formas de montaje de los pistones



1. Vertical



2. Horizontal



3. Disposición en L o en Angulo



4. Dos cilindros opuestos

Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones.** (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.), Pág.59

Todos ellos son para trabajar a una presión comprendida entre 6 y 7 bar. La presión máxima de 8-10 bar, establecida como base general, indica la presión límite a la que puede trabajar, no siendo, por supuesto, recomendable hacer que un compresor trabaje constantemente a su presión máxima.

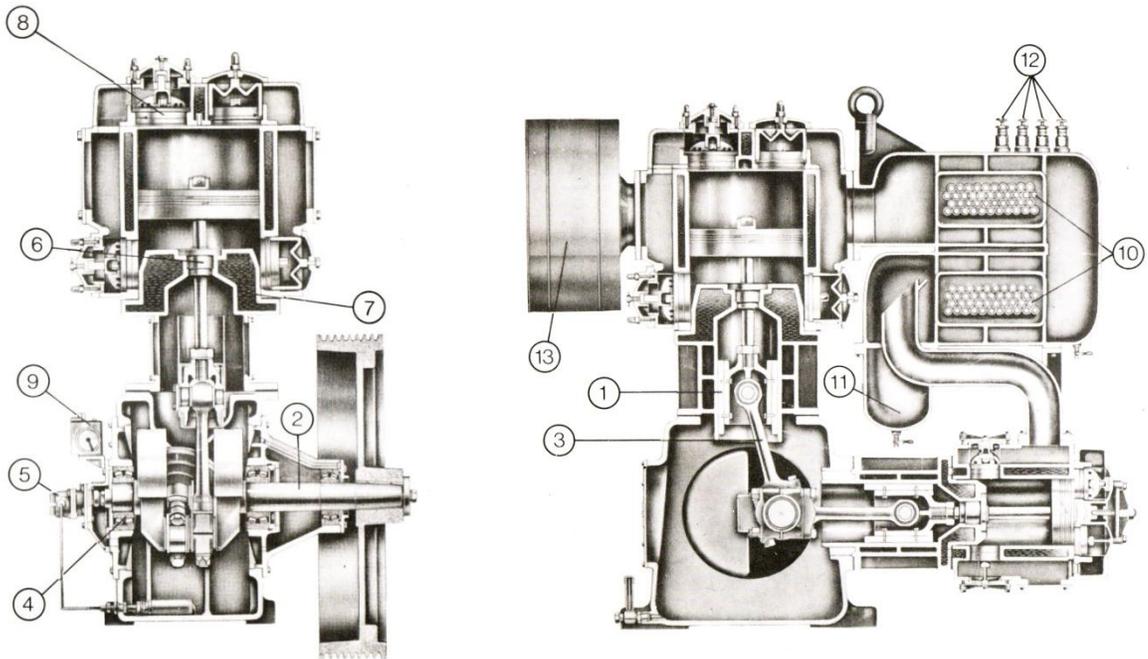
En la figura No.7 se muestra la sección de un compresor estacionario, disposición de los cilindros en L, alternativos, dos etapas, doble efecto y refrigerado por agua. Accionado por motor eléctrico de transmisión por correas trapeciales.

Se compone de las siguientes piezas:

- 1) Crucetas con zapatas ajustables, lubricadas a presión de aceite.
- 2) Cigüeñal.
- 3) Bielas.
- 4) Cojinetes de rodillos cónicos.
- 5) Bomba de engrase a engranajes.
- 6) Empaquetaduras autoajustables que sellan la cámara de compresión.
- 7) Agua de refrigeración para culatas y cilindros.
- 8) Válvula de aspiración.
- 9) Bomba de lubricación para cada cilindro.
- 10) Refrigerador intermedio de agua.
- 11) Depósito con su grifo de purga para eliminar condensados.
- 12) Válvulas de seguridad del refrigerador intermedio.

- 13) Filtro de aspiración.

Figura No.7
Sección de un compresor estacionario



Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones**. (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.), Pág.60

1.6.2.4 Regulación de los compresores

La regulación de los compresores tiene por objeto ajustar el suministro de aire cedido por los compresores a la petición de aire real solicitado por los consumos de fábrica. A veces, resulta innecesario controlar la capacidad de un compresor, pues la demanda supera la medida de producción de éste. No obstante, lo normal es que el gasto de aire comprimido sea variable y la entrega de caudal del compresor permanente, al ser accionados por motores de velocidad constante, su caudal también es constante.

Cuando la demanda de aire varía, la capacidad del compresor se regula mediante determinados sistemas. Aparte de la función de adecuar la producción al consumo, la regulación igualmente tiene por finalidad mantener la presión dentro de unos límites, ya que el aire es utilizado a una presión específica, admitiendo para ésta sólo leves tolerancias, que viene orientada por los elementos neumáticos que han sido diseñados para trabajar a una presión concreta, por lo que cualquier sobrepresión acarrearía destrozos en los órganos mecánicos.

En los compresores pequeños de 1 a 10 CV de potencia, la regulación se ejerce mediante un sistema de arranque-parada, que puede ser mecánico o electromecánico, permitiendo que el compresor se descargue cuando se ha alcanzado la presión máxima de trabajo prefijada.

Desde el punto de vista energético, es el sistema con menor costo. Por contra, el número de arranques debe limitarse a 10 ó 20 por hora, según circunstancias, porque tanto el motor eléctrico como el contacto toleran un número acotado de arranques horarios. Cada arranque, en efecto, causa un recalentamiento del motor como asimismo de los contactos, que pueden conducir a su fallo.

Otro modo de regulación consiste a caudal intermitente por marcha en vacío que se aplica en compresores de pistón a partir de 10 CV. El compresor, con este método, se encuentra continuamente en marcha, pero alterna periodos en que comprime el aire con períodos en que el aire es aspirado y luego expulsado. Esto se consigue abriendo las válvulas de admisión durante el tiempo en que no se requiera producir aire. Naturalmente, el compresor consume energía en la marcha en vacío, estimándose en un 10 - 15 % de la potencia en carga medida en el eje del compresor.

El tipo de regulación fraccionada es el más sencillo y el adoptado generalmente en los compresores de doble efecto, consistiendo en utilizar el procedimiento de puesta en vacío de un efecto, dejando comprimir al otro normalmente. Automáticamente, el compresor, si es de un cilindro, comprimirá la mitad del volumen total, reduciendo el caudal proporcionalmente.

Para no alargar la relación, en razón de que cada fabricante aplica una u otra regulación conforme a su criterio, añadiremos que todavía pueden reseñarse los modelos de: regulación progresiva de forma continuada (de 100 a 0 % por variación del espacio muerto, o de 100 a 40 % por acción dinámica); estrangulamiento de la aspiración y descarga al exterior mediante la válvula de descarga.

1.6.3 Compresores rotativos.

Reciben el nombre de compresores rotativos las máquinas que producen aire comprimido por un procedimiento rotatorio y continuo, es decir, que empujan el aire desde la aspiración hacia la descarga, comprimiéndolo.

Los modelos de más amplia difusión industrial pueden clasificarse:

- a. *De paletas*: el rotor es excéntrico en relación al estator y lleva una serie de paletas que se ajustan contra la pared interior del estator por la acción de la fuerza centrífuga.
- b. *De tornillo*: esencialmente se compone de un par de rotores que tienen lóbulos helicoidales de engranaje constante.
- c. *Tipo Roots*: consisten en una envolvente elíptica con una rueda de paleta giratoria.

1.6.3.1 Compresores de paletas

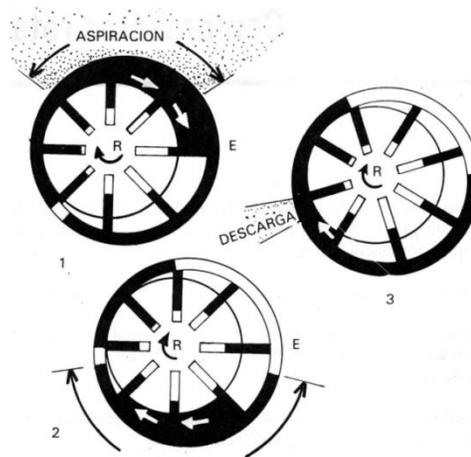
El principio de funcionamiento de estos compresores se ilustra en la figura No.8. El rotor cilíndrico *R* está colocado excéntricamente dentro del hueco tubular del estator *E*.

El rotor lleva un número de paletas radiales metidas en unas ranuras dispuestas a tal efecto y cuando el rotor gira accionado por el motor, las paletas se desplazan hacia afuera por la fuerza centrífuga, ajustándose a la pared interior del estator hasta el punto de excentricidad máxima

situado en la parte superior del estator. El volumen de aire atrapado en la cámara comprendida entre dos paletas consecutivas se comprime gradualmente mientras que la rotación del aire irá poco a poco disminuyendo y por tanto su presión aumentará por la progresiva reducción del volumen provocando la correspondiente compresión. En el momento en que llega a la lumbrera o abertura de descarga el aire será empujado a través de ella hacia la salida, habiéndose consumado el ciclo: 1) aspiración, 2) compresión y 3) descarga.

Figura 8.

Principio de funcionamiento de los compresores rotativos de paletas.



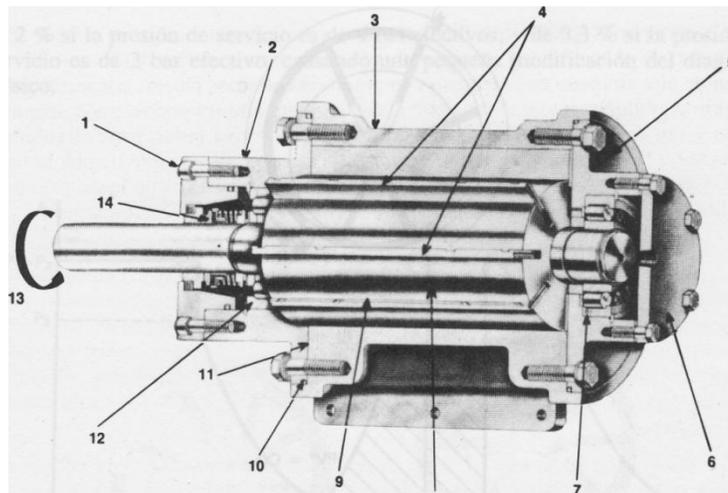
Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones.**
(Madrid: Paraninfo, S.A.), Pág.68

En la figura 9. se contempla la sección longitudinal de un compresor de paletas compuesto por las piezas mecánicas: 1) Tapa palier delantero, 2) Cárter rodamiento delantero, 3) Cilindro, 4) Paletas, 5) Cárter rodamiento trasero, 6) Tapa rodamiento trasero, 7) Rodamiento trasero,

8) Rotor, 9) Ranuras, 10) Junta, 11) Suplementos, 12) Rodamiento delantero, 13) Sentido de giro del eje, 14) Cierre mecánico.

Figura No.9

Sección longitudinal de un compresor de paletas



Fuente: Enrique Carnicer, Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones. (Madrid: Paraninfo, S.A.), Pág 69

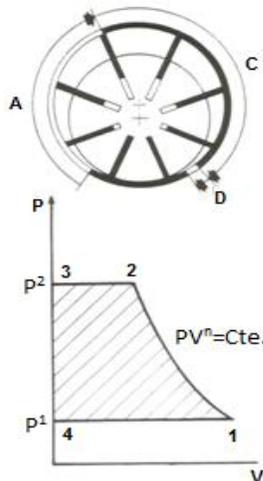
1.6.3.1.1 Diagrama de trabajo

Los ciclos de aspiración, compresión y descarga son, en definitiva, análogos a los de un compresor de pistón. Igualmente la compresión isotérmica será la que absorba teóricamente menos energía. Si bien, como siempre, sigue una compresión politrópica en la que n suele ser igual o aproximadamente a 1,35. Si tomamos un compresor ideal en el cual se considere que no hay fugas de aire de una paleta a otra, y, por consiguiente, al carecer de espacio muerto el rendimiento volumétrico sólo se vería afectado

por las fugas de aire, el diagrama de trabajo PV de un compresor de paletas vendrá representado por la figura No.10., simbolizando P_1 la presión de aspiración y P_2 la presión de descarga.

La curva 1-2 significa el trayecto de la compresión por reducción progresiva del volumen de aire. La línea 4-1 la aspiración y, dado que está desprovisto de espacio muerto o volumen perjudicial, la presión al final de la descarga desciende bruscamente de P_2 a P_1 . En conjunto, el diagrama se halla definido por los puntos números 1-2-3-4. El caudal aspirado y la potencia absorbida varían proporcionalmente a la velocidad de rotación.

Figura No.10
Diagrama P-V de un compresor de paletas



Fuente: Enrique Carnicer, Aire **Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones.** (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A Pág.70)

En la situación de que el compresor sea empleado para un trabajo de compresión diferente de aquel para el cual fue construido, el diagrama se deforma (figura 4.4.), considerando:

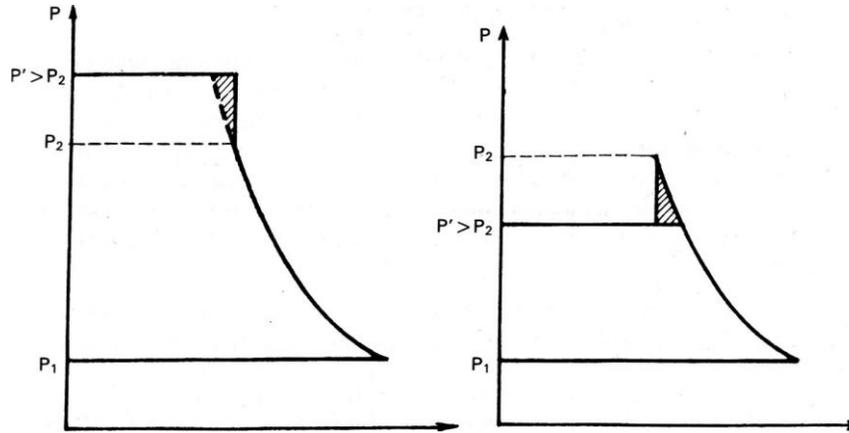
- a. Si la presión de servicio es superior a la presión de construcción (esquema *a*).
- b. Si la presión de servicio es inferior a la presión de construcción (esquema *b*).

En las dos posibilidades esta deformación corresponde a una parte del trabajo perdido y representado por la superficie rayada; las citadas partes son muy endeble por las cortas variaciones habituales de presión.

Se puede observar que si un compresor fue construido para una presión efectiva de 3 bar, el área de la superficie en los diagramas formados dan, para un rendimiento obtenido por una compresión ideal isotérmica, un suplemento de trabajo de 2 % si la presión de servicio es de 4 bar efectivos, y de 3.3 % si la presión de servicio es de 2 bar efectivo, causando una pequeña modificación del diagrama teórico.

Figura No. 11

Diagramas PV deformados conforme se altera la presión.



Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones**. (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.), Pág 71

1.6.3.1.2 Características

En los compresores de paletas, su principal campo de actuación está en presiones efectivas de 0, 5 a 4 bar; aunque hay empresas de renombre que los fabrican para una presión nominal a plena carga de 8-10 bar, oscilando su volumen entre 100 a 2.500 m³/h.

El compresor de paletas puede ser de una o dos etapas. En este último caso, se tiene prácticamente dos máquinas en serie con un refrigerador intermedio. Las dos etapas pueden estar dispuestas ambas a un solo lado del motor de comando, conectando entre sí los ejes de los dos compresores, o bien una de un lado y la otra del otro lado del motor conductor, siendo en este caso necesario un motor que tenga libres las dos extremidades del eje.

La regulación del caudal se puede lograr mediante procedimientos de marcha y detención, o bien mediante el sistema de marcha en vacío, o también la regulación neumática progresiva del caudal del cien a cero por ciento que ciñe en todo momento el caudal del aire al consumo en la red.

1.6.3.2 Compresores de tornillo

Estos compresores son asimismo de tipo volumétrico. Desde que en 1934 el profesor Alf Lysholm realiza el estudio del primer compresor rotativo de tornillo hasta nuestros días, su diseño ha sufrido un avance considerable, demostrando ser compatibles para satisfacer las necesidades de una amplia gama de caudales que van desde 2,5 a 70 Nm³/ min. En compresores de tornillo de dos etapas, para presiones máximas de trabajo de 8-10 bar

Están dispuestos de tal manera que el rotor macho se encuentra dotado de lóbulos con un perfil de estudiado diseño, y el rotor hembra de acanaladuras en las cuales se introducen los lóbulos en el curso de la rotación. El accionamiento del conjunto tiene lugar por el extremo del eje que lleva el rotor macho, quien arrastra por contacto a la hembra, o lo hace mediante engranajes sincronizados que

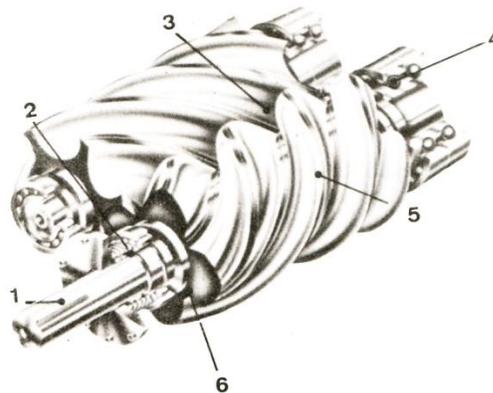
posicionan relativamente los elementos con enorme exactitud, consiguiendo en ambos casos la intercepción mutua entre los cuatro lóbulos del macho y los seis canales de la hembra.

El rotor macho es el que absorbe la potencia suministrada por el motor, estableciéndose alrededor del 85 al 90 % de la potencia total para él, dejando un 10 al 15 % para el rotor hembra. Los rotores giran a unas velocidades lentas sobre rodamientos de bolas y rodillos, con interposición de una película de aceite que sirve para sellar el espacio de compresión y eliminar el calor que se origina durante la compresión.

Figura No. 12

Rotores paralelos de tipo tornillo con perfil asimétrico.

1. Árbol motor.
2. Cierre mecánico de estanqueidad
3. Rotor hembra.
4. Cojinetes de bolas.
5. Rotor macho.
6. Perfil de rotores.



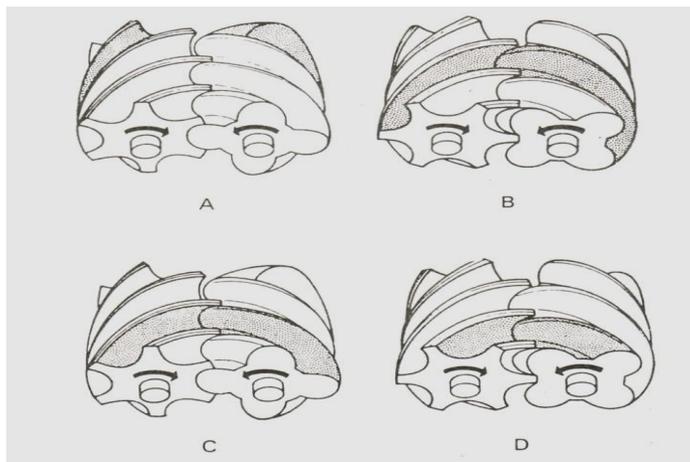
Fuente: Enrique **Carnicer**, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones**. (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.), Pág.72

1.6.3.2.1 Diagrama funcional del compresor de tornillo

Lo que esencialmente distingue al compresor de tornillo es que el aire se comprime entre sus lóbulos de una forma continua y progresiva. Los rotores van montados en un cárter provisto de una admisión para aire en un extremo y una salida en el otro. El rotor macho ha girado $1/4$, y el hembra $1/6$ de revolución, en cada una de las figuras del diagrama (figura No. 13). Conforme giran los rotores, los espacios que hay entre los lóbulos van siendo ofrecidos al orificio de admisión y el incremento del volumen experimentado provoca un descenso de presión, con lo que dichos espacios empiezan a llenarse de aire (A). Al mismo tiempo se inyecta aceite sometido a presión neumática en el aire entrante; no hay bomba de aceite.

Figura No 13.

Diagrama funcional del compresor de tornillo.



Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones**. (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.), Pág.73

A,B,C,D, indican cómo el aire aspirado llena el espacio entre dos lóbulos, comprimiéndose progresivamente el aire.

Cuando los espacios interlobulares están completamente cargados de aire, la rotación, que prosigue, cierra el orificio de admisión y comienza la compresión (B). El volumen de aire que hay entre los rotores de engrane continuo sufre aún una mayor reducción (C). En el momento en que se alcanza la presión final a que se somete el aire, el espacio interlobular queda conectado con el orificio de salida (D). La mezcla descargada de aire/aceite pasa por un separador que elimina las partículas de aceite. Entonces fluye el aire limpio para ser usado.

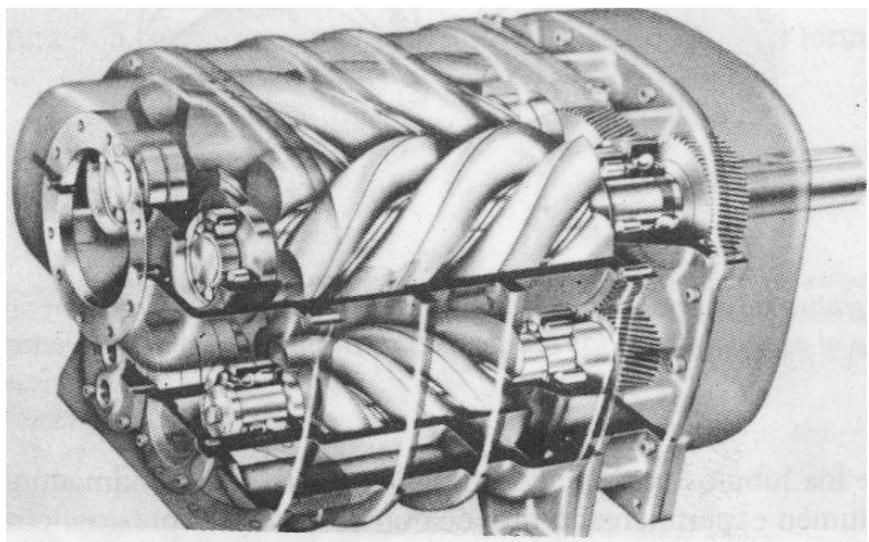
Los compresores de tornillo tienen compresión interna y su relación de compresión viene determinada por la situación de los bordes de apertura de descarga y por la figura geométrica que adopte el perfil del par de tornillos. Un compresor de tornillo con inyección de aceite y perfiles asimétricos puede alcanzar relaciones de compresión en una sola etapa cercana a los 4 bar y en dos etapas de 12 bar.

El diagrama P - V de trabajo es similar al de los compresores de paletas, pudiendo dibujar un gráfico colocando en las abcisas los ángulos de giro de cualquiera

de los dos rotores. Los compresores de dos etapas se acercan en su diagrama de compresión a la curva isotérmica, mientras que los de una etapa coinciden con la adiabática.

Los compresores de dos etapas (fig.14) constan de cuatro rotores situados dos a dos encima uno del otro. Tanto la etapa de baja presión como la de alta presión están compuestas por dos rotores secundarios arrastrados directamente por los rotores primarios sin la mediación de ningún dispositivo de sincronización adicional. Un sistema hidráulico contrarresta el esfuerzo sobre los rodamientos soportando las cargas axiales de los rotores. El aceite inyectado en el interior de cada una de las dos etapas absorbe el calor que se genera durante la compresión.

Figura No. 14
Compresor de tornillo de dos etapas



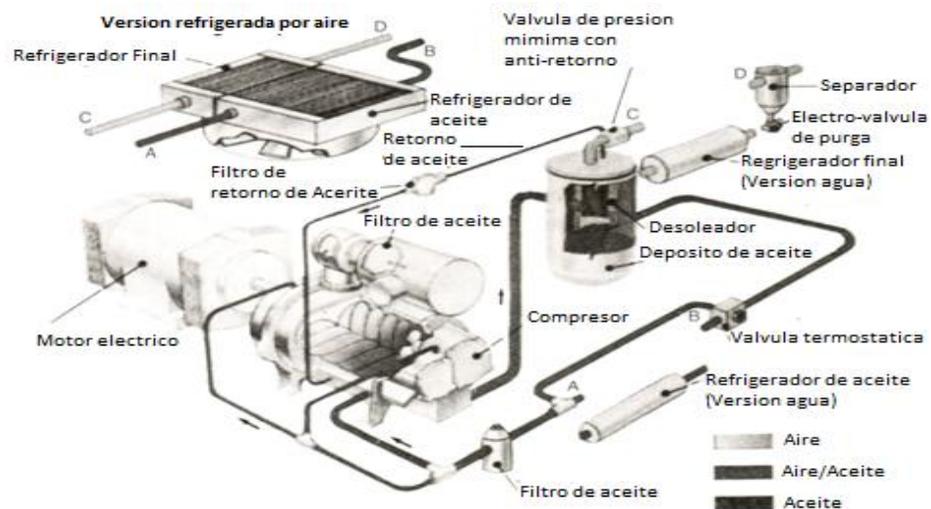
Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones**. (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.), Pág 74

Habitualmente, la central de los compresores de tomillo está inserta en el interior de un habitáculo construido a base de paneles laterales y superior, incluidos unos tabiques internos forrados con espuma de poliuretano prácticamente ininflamable a fin de conseguir su insonorización. Para dar cifras de insonorización, algunos fabricantes se guían por la norma DIN 45635; otros por el código de pruebas Cagi-Pneurop.

a) Circuito aire/aceite

En la figura No.15 está esquematizado el recorrido seguido por el aire, desde su entrada por el filtro hasta su salida por el depósito para su uso general, y el del circuito de lubricación correspondiente en las dos versiones de refrigerado por agua y refrigerado por aire.

Figura No 15.
Esquema de los circuitos de aire y aceite.



Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones**. (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.), Pág.75

El aire exterior pasa por entre el filtro de aspiración y llega al compresor por el orificio de aspiración. El aire es arrastrado y comprimido en el espacio hueco entre los rotores por reducción de volumen. A su vez, se introduce una película de aceite como agente refrigerador que se une con el aire, mientras la compresión prosigue hasta que la mezcla aire/aceite alcanza la presión de impulsión y los orificios de descarga quedan abiertos.

El aire comprimido, teniendo dentro de sí aceite, pasa a la cámara de descarga, siendo enviado a la tubería que va al depósito, en donde es sometido a una primera separación entre el aceite y el aire a consecuencia del contacto con las paredes internas del depósito y a un descenso en la velocidad. La mayor parte del aceite es separado y cae al fondo del depósito. Posteriormente, se dirige a un desoleador para su eliminación final.

El aceite, cuya introducción tiene como finalidad garantizar la refrigeración, el engrase y la estanqueidad, por la diferencia de presión entre el depósito y el compresor, circula desde el depósito hacia una válvula termostática que permite encauzar una parte del aceite en sentido del refrigerador, y la otra parte directamente a la salida de éste. Al hallarse reconectados estos dos

circuitos, el aceite se filtra, siendo nuevamente inyectado al compresor y a los cojinetes.

Por la compresión efectuada, la temperatura del aceite de refrigeración aumenta, y ha de enfriarse para recuperar la temperatura normal de lubricación. Para ello se establecen dos versiones: el aceite se enfría en un refrigerador de agua del tipo de haces tubulares, o bien en un refrigerador de aire consistente en un radiador que lleva adosado un ventilador. Si durante el funcionamiento del compresor la temperatura ambiente sube por encima de los 40°C, es indispensable evacuar su energía calorífica para otros menesteres, ayudando a contribuir al ahorro energético.

b) Regulación

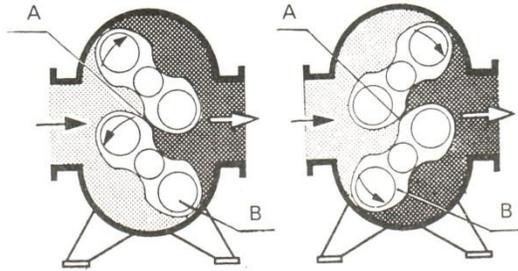
Existen diversas variantes, algunas de las cuales alcanzan una extremada sofisticación. Se puede elegir conforme la modalidad de funcionamiento. En esta situación se modula automáticamente entre dos conceptos: todo o nada (0-100 %) o proporcional; y para servicios intermitentes con paro retardado del motor si las condiciones de explotación engendran un número reducido de arranques por hora o el consumo de aire resulta irregular y variado.

1.6.3.3 Compresores roots

Los compresores Roots (fig. 16.) conocidos también con el nombre de soplan-tes, tienen un amplio campo de aplicación para bajas presiones. Dentro de un cuerpo de bomba o estator, dos rotores de perfiles idénticos en forma de 8, giran a velocidad angular constante, en sentido inverso el uno del otro. Estas rotaciones están sincronizadas por un juego de engranajes exteriores, lubricados por baño de aceite. A diferencia de otros compresores, los rotores no rozan ni entre sí ni con el estator, existiendo una pequeña tolerancia entre estos; por consiguiente, no pueden efectuar compresión interior, ya que el volumen de las cámaras de trabajo no disminuye durante la rotación.

Estos compresores únicamente transportan del lado de aspiración al de compresión el volumen de aire aspirado, sin comprimirlo en este recorrido. El volumen que llega a la boca de salida, todavía con la presión de aspiración, se junta con el aire ya comprimido que vuelve de la tubería de descarga y se introduce en la cámara cuyo contenido llega en ese momento a la presión máxima, siendo descargado seguidamente.

Figura No. 16
Compresor Root. A) Juego entre rotores. B) Rotor motriz



Fuente: Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones**. (Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.) Pág.77

Disponen de la ventaja de que la ausencia de fricción entre los rotors hace innecesaria la lubricación en la cámara de compresión, lo cual permite la entrega de un aire totalmente exento de aceite que pudiera contaminarlo.

Son muy aceptados en la impulsión neumática de materiales a granel, en los camiones-silo, fábricas de cemento y un largo etcétera de posibilidades industriales, ya que sus formas constructivas presentan aspectos muy variados.

1.6.3.4. Compresores secos

Cuando el agente comprimido que ha de producir un-compresor tiene que quedar exento de aceite, hay que

recurrir a compresores de pistón o de tornillo en los que ningún aceite de lubricación o sucedáneo entre en contacto con el gas a comprimir, resolviendo la mencionada necesidad mediante cámaras de compresión sin lubricante. Son los vulgarmente llamados "compresores secos", cuyo adjetivo no concuerda con la realidad, pues el aire sigue estando húmedo, denominándose mejor "compresores exentos de aceite o sin lubricación".

Desde luego que es imposible conseguir un aire real y absolutamente exento de aceite, si bien los compresores secos, teóricamente, producen aire libre de aceite, puesto que trabajan con cámaras de compresión sin lubricación. No obstante, aspiran el aire del medio ambiente, aunque estén equipados con filtros de admisión de alto rendimiento, concentran las impurezas que se encuentran en el mismo por pocas que sean. Independientemente del uso que se le dé al equipo, en absoluto se puede garantizar que no dejarán de pasar partículas. Así que la definición de aire exento de aceite deberá ser: aire al que, por medios prácticos, se ha eximido de aceite hasta tal punto que no se pueden detectar trazas de aceite en las líneas de aire comprimido.

Por tanto, es evidente que el tener un compresor exento de aceite no excusa el colocar filtros de aire cerca del punto de consumo, ya que el aire es portador en una dosis más o menos grande, de contaminantes a veces imperceptibles.

1.7 Deposito de aire

Toda instalación de aire comprimido dispone de un depósito de aire a presión entre el compresor y la red de distribución, procurando evitar las distancias largas entre el compresor y el depósito.

La función de los depósitos de aire es:

- a. Amortiguar las pulsaciones del caudal de aire salido de los compresores alternativos.
- b. Hacer frente a las demandas puntas de caudal sin que se provoquen caídas de presión.
- c. Adaptar el caudal de salida del compresor al consumo de aire en la red.

No se debe confundir un depósito con una fuente de energía por aire, pues, cuando el depósito actúa de acumulador (si se dispone de reserva de aire suficiente), es para atender a una demanda de aire instantánea y nunca para suministrar aire continuamente. Tampoco es recomendable conectar varios compresores a un solo depósito. Lo que sí es conveniente, en muchas circunstancias, es instalar uno o más recipientes adicionales después del depósito principal.

Si el depósito se coloca cerca del compresor sin refrigerador posterior, e incluso así, interviene como un paso más en el enfriamiento del aire, recibiendo una emulsión de aceite con agua, que deberá ser evacuada por

un drenado, sea éste continuo o periódico. Debemos tener en mente que las paredes de los depósitos se calientan sufriendo una alteración acelerada por el contacto íntimo con el aire a presión y las altas temperaturas. Esta oxidación produce un calor que bajo ciertas condiciones, puede llegar a no disiparse totalmente, dando lugar a la combustión espontánea de la masa combustible y del aerosol aceite-aire. Este incendio puede dar origen a una explosión de consecuencias lamentables.

La fabricación de los depósitos de aire comprimido tiene que llevarse a cabo atendiendo al Reglamento Español de recipientes a presión, de fecha 16 de agosto de 1969, y cumpliendo las normas de seguridad indicadas en las Ordenanzas Españolas de Seguridad, pues están sujetos a inspecciones periódicas obligatorias.

Los depósitos de aire comprimido son horizontales o verticales, se construye en chapa de acero y consta de dos fondos repujados con convexidad exterior. Los fondos son generalmente embutidos y tienen forma de bóveda esférica; van unidos a la virola mediante una curva de enlace.

Los depósitos llevan los accesorios que se mencionan: válvula de seguridad que permita la evacuación total del caudal del compresor con sobrecarga que no exceda del 10 %, manómetro, purga, racor de toma del sistema de regulación del compresor y agujero de limpieza.

1.7.1 Capacidad

La capacidad del depósito de aire comprimido está determinada por el caudal del compresor. No obstante, el sistema de descarga del compresor es el factor determinante para calcular el límite inferior de la capacidad del depósito. Si funciona a intervalos muy repetidos se descargará rápidamente, y, por otro lado, resultarán variaciones de carga demasiado frecuentes en la instalación eléctrica. Si el compresor es de regulación automática, la capacidad del depósito en m^3 no debe ser inferior al caudal del compresor en m^3 por minuto. Esta norma se adapta si la variación de presión es de 1,5 bar. Para una diferencia de presión más pequeña o más grande, se puede calcular la capacidad del depósito proporcionalmente a la diferencia de presión. Excepto en casos especiales, el compresor no debe arrancar más de diez veces por hora, y en ninguna situación, más de quince veces por hora.

Si se admite que la presión en las bocas de salida no puede variar más de 0,7 bar sin causar problemas, entonces el depósito, para poder soportar durante un minuto la carga, deberá tener un volumen de 1,4 veces la capacidad del compresor en $m^3/\text{min.}$, de aire libre.

Como orientación, la capacidad del depósito está determinada según el tipo de regulación y puede calcularse por las siguientes fórmulas aproximadas:

Para válvula pilotoC = V 30 P
litros

Automática con presostato.....C = V 35 P
litros

Automática con presostato y contactos.....C = V 40 P
litros

Automática con arrancador y/A.....C = V 75 P
litros

Siendo P la potencia del compresor o la potencia total instalada en CV, y V , el volumen en litros del depósito o de todos los depósitos existentes apropiadamente comunicados entre sí. En la práctica, los depósitos están normalizados y cada fabricante aconseja cuáles irán correctamente a la capacidad del compresor propuesto.

2. COSTO DE ENERGIA

La razón de ser de cualquier proyecto de ingeniería, aparte de resolver un problema o facilitar la operación de un proceso, es buscar que esta solución sea conveniente desde el punto de vista económico, esto quiere decir que vamos a buscar que nuestras soluciones se enfoquen a reducir los costos o gastos de recursos que actualmente utilizamos para realizar cualquier tarea o proceso.

Dentro del presente estudio uno de los enfoques que se da, es conocer cuánto gasta por concepto de energía eléctrica utilizada para mantener operando un sistema de producción de aire comprimido en la industria para proyectar los beneficios que se pueden obtener luego de implementar este diseño.

El papel primordial del planificador dentro de una empresa de distribución de energía eléctrica es el estudiar y recomendar las mejores opciones de suministro que permitan a la empresa la satisfacción de la demanda de energía del sistema. Debe entenderse, como óptima, aquella estrategia que dentro de las políticas de la empresa, representa costos mínimos a lo largo del periodo de la planificación y permite mantener los mejores estándares de confiabilidad en el servicio eléctrico. El conocimiento de los factores de servicio reales como resultado de un estudio de consumo-demanda permite la estructuración adecuada de tarifas.

2.1 Parámetros a controlar en la energía eléctrica

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos, cuando se les coloca en contacto por medio de un conductor eléctrico para obtener trabajo. A continuación se presentan parámetros importantes en el control de la energía eléctrica.

2.1.1 Factor de potencia

En un sistema eléctrico, uno de los factores a controlar es el factor de potencia. Este factor resulta de la comparación de la potencia aparente (KVA) con la potencia real (KW).

El censado se lleva a cabo por medio de un medidor de desfase entre voltaje y corriente. El actuador consiste en un sistema de conmutación que conecta y desconecta bancos de capacitores. El sistema de control que puede ser analógico o digital interpreta los datos del sensor, calcula la manera como deben conectarse estos bancos de capacitores y también cuenta con un sistema de temporizadores que evita la oscilación y el mal funcionamiento.

2.1.2 Demanda (KW)

Otro parámetro importante a controlar es el pico de demanda máxima de potencia. Esta medición se hace continuamente por parte de la compañía suministradora y se registra el valor más alto de la demanda de todo el mes. En base a este valor máximo se calcula la facturación.

El censado se lleva a cabo con un transductor de potencia que calcula la potencia instantáneamente, o en instalaciones con tarifa horaria por medio de conteo de pulsos del medidor instalado por la compañía suministradora.

2.1.3 Energía (KWh)

Para fines de facturación el concepto de energía es representado por la integración de la potencia en el tiempo, esto quiere decir que es la suma de kilovatios hora que han sido requeridos por el usuario al finalizar el periodo de tiempo de facturación.

Define el valor o concepto de demanda en que este valor no se reinicia cada quince minutos sino va sumando los kilovatios hora consumidos a lo largo del mes facturado.

Este valor está relacionado con el valor de energía que nos publica el proveedor de energía eléctrica y es el que se multiplica en la factura por el precio en dinero por KWH consumido bajo el concepto de energía.

El método de control de energía más usado consiste en encender y apagar cargas por medio de un temporizador. La complejidad y flexibilidad del temporizador dependerá de su precio. Este "controlador" tendrá la tarea de eliminar el encendido y apagado manual de cargas, asegurando la repetitividad y precisión.

2.2 Mediciones

2.2.1 Energía

Los KWh se miden por integración de la demanda a lo largo del tiempo. Los medidores mecánicos llevan a cabo esta integración por medio de un sistema de relojería que va desplazando unos engranes con indicadores durante el período de consumo.

Los medidores electrónicos hacen el equivalente por medio de manejo de información. En este caso también es posible medir el consumo en diferentes periodos del día. En el caso de tarifas horarias, es importante acumular los pulsos de cada horario por separado. Este tipo de medidores son obligatorios en el caso de tarifa horaria.

a. Medidor de consumo eléctrico: medidor de energía eléctrica, contador eléctrico o Vatihorímetro es un dispositivo que mide el consumo de energía eléctrica de un circuito o un servicio eléctrico, siendo esta la aplicación usual.

Existen medidores electromecánicos y electrónicos. Los medidores electromecánicos utilizan bobinados de corriente y de tensión para crear corrientes parásitas en un disco que, bajo la influencia de los campos magnéticos, produce un giro que mueve las agujas de la carátula. Los medidores electrónicos utilizan convertidores analógicos-digitales para hacer la conversión.

b. Funcionamiento: El medidor electromecánico utiliza dos juegos de bobinas que producen campos magnéticos; estos campos actúan sobre un disco conductor magnético en donde se producen corrientes parásitas.

La acción de las corrientes parásitas producidas por las bobinas de corriente sobre el campo magnético de las bobinas de voltaje y la acción de las corrientes parásitas producidas por las bobinas de voltaje sobre el campo magnético de las bobinas de corriente dan un resultado vectorial tal, que produce un par de giro sobre el disco. El par de giro es proporcional a la potencia consumida por el circuito.

El disco está soportado por campos magnéticos y soportes de rubí para disminuir la fricción, un sistema de engranes transmite el movimiento del disco a las agujas que cuentan el número de vueltas del medidor. A mayor potencia más rápido gira el disco, acumulando más giros conforme pasa el tiempo.

Las tensiones máximas que soportan los medidores eléctricos son de aproximadamente 600 voltios y las corrientes máximas pueden ser de hasta 200 amperios. Cuando las tensiones y las corrientes exceden estos límites se requieren transformadores de medición de tensión y de corriente. Se utilizan factores de conversión para calcular el consumo en dichos casos.

También es importante indicar que existe una bobina de sombra que es una chapita la cual esta cortocircuitada. Dicha bobina posee una resistencia eléctrica despreciable y por ende en esta se generará una corriente muy importante, la cual al estar sometida a un campo generara un par motor que eliminara el coeficiente de rozamiento de los engranajes. El medidor comenzara a funcionar con el 1 % de la carga y entre un factor de potencia 0,5 en adelanto y atraso

2.2.2 Factor de potencia:

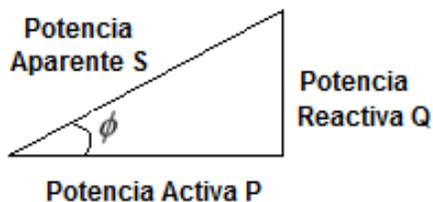
El factor de potencia (f.p.) es el resultado de dividir energía activa (KWh) y la energía aparente (la resultante de la potencia activa y la

reactiva) acumuladas durante todo el periodo de consumo (típicamente un mes).

$$f.p = \frac{\text{Potencia activa (KWh)}}{\text{Potencia aparente (KVAh)}}$$

Figura No. 17

Triangulo de potencias



Fuente: Elaboración Propia, año 2010.

El medidor de potencia reactiva es idéntico al de energía activa, sólo que está instalado para medir los KVARh.

2.2.3 Demanda

La medición de la demanda es la más sofisticada. Existen dos tipos de medidores:

- a. De aguja: este es un medidor que obtiene el valor de la demanda máxima por medio de dos agujas en una carátula: la aguja de "arrastre", que requiere ser inicializada a cero manualmente y que es empujada por la aguja de medición.

La aguja de medición es medida por medio de un elemento que cuenta con cierta inercia sobre el cual operan la multiplicación instantánea de voltaje y corriente. Este medidor está hecho para tener un tiempo de respuesta aproximado de 10 a 15 minutos.

Es común este tipo de medidor en instalaciones de menos de 1 MVA que no están sujetas a tarifa horaria.

- b. De pulsos. Este es el método más preciso y se utiliza tanto en medidores mecánicos, como electrónicos. A estos medidores se les conecta un registrador que permite indicar la hora a la que ocurrió el consumo. Este medidor es obligatorio para tarifas horarias.

2.3 Tarifas eléctricas

Generalmente son tres los conceptos que se consideran para formular las facturas de consumo de energía eléctrica: la demanda máxima, la energía consumida y el factor de potencia.

Los cargos por concepto de la demanda se basan en los costos de generación de la energía eléctrica, de la transmisión y de la distribución de la misma, tomando en cuenta los medios disponibles para tal efecto. Se

incluyen aquí los cargos redituables de la inversión, incluyendo intereses, impuestos, amortizaciones, etc.

2.3.1 Cargos por demanda máxima

Entre mayor sea la demanda de energía en un momento dado por un período de 15 minutos, más alto será también el cargo por demanda. Entre más uniformemente se pueda repartir el consumo de energía eléctrica en una planta, más bajo será el cargo por demanda.

2.3.2 Cargos por energía consumida

Los costos de operación de la parte de la factura de consumo de energía eléctrica se basan en el número de kWh registrados en el término de cierto período. Para establecer comparaciones, tómese en consideración este período de facturación. El número de días de trabajo y el número de días cubiertos tendrán diferencias.

2.3.3 Cargos por bajo factor de potencia

Debido a que la compañía suministradora tendrá que transmitir una corriente mayor a un sistema con bajo factor de potencia, que si hacia otro cuyo factor de potencia sea más alto, se ha introducido una

cláusula al respecto para llevar a cabo la facturación. Esta cláusula ofrece una reducción en las cuotas de consumo para cargas con factor de potencia alto, o impone una multa si el factor de potencia es bajo.

2.4 Estructura de las tarifas

La estructura de las tarifas por consumo de energía eléctrica se basa en los costos de suministro a los usuarios, por lo cual se han tomado en cuenta las diferencias regionales, estaciones del año, horarios de consumo, nivel de la tensión de suministro y la demanda.

2.4.1 Tipos de tarifas

De acuerdo a lo establecido a la Ley General de Electricidad, a partir de 1998, los usuarios, se clasifican en:

- a) Usuario Regulado: son los usuarios cuyo consumo es menor a 100 kilovatios (kW)

- b) Usuario No Regulado o Gran Usuario: es un consumidor cuya demanda de potencia excede 100 kilovatios (kW), y esta registrado como tal en el Ministerio de Energía y Minas. En este caso las condiciones de suministro (potencia y energía) son pactadas con el distribuidor o cualquier otro suministrador

(comercializador). El pago por el uso de la red de distribución ó peaje en función de transportista si está regulado, y está establecido por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) en las resoluciones donde se establecen los pliegos tarifarios correspondientes.

Así, las tarifas dependen únicamente del nivel de tensión (MT, BT) en que está conectado el usuario, y si se consume en punta o fuera de punta, no en función del uso final de la energía. En ese sentido se clasifican en tres categorías:

Tabla No. II
Categorías de tarifas

Categoría	Descripción	Demanda de potencia	Tipo de tarifa aplicada
A	Usuarios con servicio en baja tensión	Menor o igual a once kilovatios (kW)	Baja Tensión Simple (BTS); Baja Tensión Simple Social (BTSS).
B	Usuarios con servicio en baja o media tensión *	Mayor de 11 kilovatios (kW)	Baja Tensión con Demanda en Punta (BTDP), Baja Tensión con Demanda fuera de Punta (BTDFP), Baja Tensión Horaria (BTH), Media Tensión con Demanda en Punta (MTDP), Media Tensión con Demanda fuera de Punta (MTDFP), Media Tensión Horaria (MTH).
C	Usuarios con servicio en baja o media tensión que cumplan con los requisitos establecidos en la legislación vigente para obtener la calidad de Gran Usuario		En este caso las condiciones de suministro (potencia y energía) son pactadas con el distribuidor o cualquier otro suministrador (comercializador). No tiene tarifa máxima. Solamente se le define un pago máximo por el uso de la red, denominado Peaje en Función de Transportista

Fuente: <http://www.Empresa eléctrica de Guatemala>, 2010. Pág 40

Algunas consideraciones generales acerca de las categorías tarifarias:

- a) La Tarifa Social es una tarifa especial con carácter social, aplicada al suministro de energía eléctrica dirigida a usuarios regulados conectados en baja tensión sin cargo por demanda, de acuerdo a lo definido en la Ley General de Electricidad y su Reglamento, y la Ley de Tarifa Social. Se reconoce como Usuario de Tarifa Social a todo usuario que consuma la cantidad igual o inferior a 300 kWh en un período de facturación mensual, o que tenga un consumo promedio diario de hasta 10 kWh.

- b) Los usuarios de la categoría podrán elegir libremente su propia tarifa dentro de las opciones tarifarias aprobadas por la comisión en los pliegos tarifarios. En el caso que el usuario no pueda determinar la tarifa adecuada a su tipo de consumo de energía eléctrica, la distribuidora deberá aplicar la tarifa que represente el mayor beneficio para el usuario, con base a sus características de consumo.

- c) Las Tarifas Horarias en Baja ó Media Tensión (BTH ó MTH) son aquellas cuyo medidor permite discriminar el consumo por horas, y tienen precios diferenciados de energía por banda horaria. Las bandas horarias correspondientes a los períodos de máxima (punta), media (intermedia) y mínima (valle) son las definidas en el artículo 87 del Reglamento del Administrador del Mercado

Mayorista o las que en el futuro determine la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE).

2.5 Normas de facturación por el proveedor de energía.

Los comercializadores de energía eléctrica aplican diferentes normas para la facturación y coste de la energía eléctrica, todos estos principios, regulaciones y normas están definidos y regulados en la ley general de la electricidad, en las normas técnicas del servicio de distribución y en el reglamento de mercado mayorista

Para el efecto que estamos realizando, queremos conocer cuál es el costo de operación por concepto de pago por consumo de energía eléctrica únicamente de la sala de producción de aire comprimido, además debemos considerar que la instalación de esta sala está asociada a una instalación que está incluida como consumidor mayorista, por lo que la facturación y costeo de energía eléctrica esta normado dentro del reglamento del mercado mayorista.

2.5.1 Potencia contratada

Cuando un usuario establece un contrato con un proveedor de energía eléctrica, define en este contrato la potencia que el proveedor está obligado a tener disponible en cualquier momento que el usuario la requiera.

La potencia contratada da derecho a tener una demanda máxima de potencia igual a dicho valor suscrito, la unidad de medida para este valor será en kilovatios.

Si la distribución detecta que la potencia utilizada por el usuario es mayor que la potencia contratada, según el artículo 75 de las normas técnicas de sistema de distribución, el proveedor podrá cobrar la potencia utilizada en exceso a un precio máximo de dos veces el valor unitario por potencia contratada de la tarifa correspondiente, por cada kilovatio utilizado en exceso.

2.5.2 Demanda máxima

Es el valor máximo registrado por los demandómetros y es el valor que se aplica para objeto de facturación, su unidad de medida es en kilovatios. Si el valor de demanda máxima es menor a la potencia contratada, el valor de demanda máxima se multiplica por el valor en dinero por KW mes que dentro del contrato se ha establecido y es el valor que en la factura eléctrica aparece bajo el concepto de potencia.

2.5.3 Factor de carga

Es un valor constante que corresponde aplicarse a aquellos usuarios o consumidores a quienes no se les mide su consumo de potencia.

Este valor se puede obtener de estudios de caracterización de carga de acuerdo a las características del consumidor que se describen en el artículo 89 del reglamento de la ley general de electricidad. Además la comisión nacional de energía eléctrica puede fijar estos valores en base a valores obtenidos por empresas distribuidoras que realicen programas de eficiencia energética.

2.5.4 Factor de potencia

Otro punto que es muy importante y tiene mucha influencia en el monto pagado mensualmente en una factura de consumo de energía eléctrica es el factor de potencia, que es la relación entre la potencia aparente total medida en KVA y la potencia real medida en KW, se debe recordar que dentro de los compromisos que el usuario adquiere al contratar un servicio de suministro de energía eléctrica, se compromete a tener en toda su instalación un factor de potencia igual o mayor a 0.90 para los usuarios cuya potencia contratado excede los 11KW, según el artículo 49 de las normas técnicas del servicio de distribución, teniendo claro que el incumplimiento a este punto generara penalizaciones.

Según el Artículo 51 de las normas técnicas del servicio de distribución todo lo relativo a la penalización por bajo factor de potencia debe estar incluido en el contrato entre el distribuidor y el usuario, y además debe regirse por los pliegos tarifario fijados por la comisión nacional de energía.

2.5.5 Otros cargos

A parte de los factores que hemos mencionado anteriormente, la comisión nacional de energía y el administrador del mercado mayorista han emitido algunas regulaciones que contemplan otros cargos que afectan al usuario final del servicio de energía eléctrica.

En la factura de energía eléctrica aparecen estos cargos bajo los siguientes conceptos:

Tabla No. III

Justificación de los otros cargos que encontramos en una factura de servicio de suministro de energía eléctrica.

Resolución que ampara el cargo	Concepto que justifica el cargo	Porcentaje aproximado en una factura de servicio
CNEE 127 - 2005	Costo de transmisión en el sistema primario. Valor nuevo de reemplazo para la infraestructura de distribución en el sistema primario. Costo de peaje por las subestaciones transformación y distribución	0.27%
CNEE 128-2005	Costo anual transmisión en redes secundario propiedad del INDE.	2.67%
CNEE 77-2004	Ajuste por el valor agregado de distribución y cargos fijos por generación, transporte y distribución por usuario para consumidores que se sirven de la EEGSA o sus comercializadoras	25.32%
NCC 5 del AMM	Según la norma de coordinación comercial del administrador del	

	mercado mayorista, este cargo corresponde a los sobrecargos de generación forzada	5.10%
NCC 8 del AMM	Cargos por servicio complementarios, que contempla las reservas de operación de los entes generadores destinados a satisfacer las variaciones en la frecuencia, energía y potencia reactiva requeridos y suministrados en el sistema nacional de energía eléctrica	4.1%
CNEE 180 – 2005	Es un cargo que se hace por los costos causados por la diferencia causados por la diferencia entre la potencia contratada y la potencia consumida establecida en el contrato de servicio entre consumidor y proveedor	7.5%

Fuente:<http://www.Empresa eléctrica de Guatemala>. Año 2010. Pág. 56

2.5.6 Costo actual de la energía eléctrica

Después de revisar los conceptos anteriores podemos darnos cuenta que para efectos del presente estudio vamos a tener que definir un valor aproximado lo suficientemente aceptable para definir el costo de la energía que utilizamos para mantener activa la operación actual de la sala de producción de aire comprimido.

Podemos tomar en valor por kilovatio hora individual respecto a los valores promedio totales de facturación de energía eléctrica, y este valor proyectado está afectado por todos los recargos anteriores definidos y con los porcentajes de participación de cada cargo definidos en la tabla anterior, podemos saber cuantitativamente cuando afecta cada cargo a casa kilovatio hora consumido. En la Tabla No. 4 se presenta en pliego tarifario de EGSA para facturar de Agosto a Octubre del 2010.

Tabla No. IV
Pliegos Tarifarios EEGSA

PARA FACTURAR EN RESOLUCION NÚMERO	Ago-Oct 10 CNEE-179-2010
BAJA TENSION SIMPLE - BTS	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	8.628011
Cargo por Energía (Q/kWh)	1.748283
BAJA TENSION Con Demanda en Punta - BTDp	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	198.444246
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)	1.384200
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW-mes)	55.057735
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	80.577335
BAJA TENSION Con Demanda fuera de Punta - BTDfp	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	198.444246
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)	1.377261
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW-mes)	38.492975
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	55.178686
BAJA TENSION HORARIA - BTH	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	198.444246
Cargo Unitario por Energía en Punta (Q/kWh)	1.461937
Cargo Unitario por Energía Intermedia (Q/kWh)	1.391062
Cargo Unitario por Energía en Valle (Q/kWh)	1.313765
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW-mes)	40.165118
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	57.695178
MEDIA TENSION Con Demanda en Punta - MTDp	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	688.236418
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)	1.310423
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW-mes)	48.167474
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	19.986934
MEDIA TENSION Con Demanda fuera de Punta - MTDfp	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	688.236418
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)	1.302987
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW-mes)	29.923233
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	13.479227
MEDIA TENSION HORARIA - MTH	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	688.236418
Cargo Unitario por Energía en Punta (Q/kWh)	1.383560
Cargo Unitario por Energía Intermedia (Q/kWh)	1.316662
Cargo Unitario por Energía en Valle (Q/kWh)	1.243704
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW-mes)	31.063875
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	13.918565
TARIFA DE ALUMBRADO PUBLICO - AP	
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)	2.080865
PEAJE EN FUNCIÓN DE TRANSPORTISTA BAJA TENSION - PEAJEFT_BT	
Cargo Unitario por Pérdidas de Energía en Punta (Q/kWh)	0.109213
Cargo Unitario por Pérdidas de Energía Intermedia (Q/kWh)	0.103938
Cargo Unitario por Pérdidas de Energía en Valle (Q/kWh)	0.098184
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW)	92.569304
PEAJE EN FUNCIÓN DE TRANSPORTISTA MEDIA TENSION - PEAJEFT_MT	
Cargo Unitario por Pérdidas de Energía en Punta (Q/kWh)	0.026859
Cargo Unitario por Pérdidas de Energía Intermedia (Q/kWh)	0.025561
Cargo Unitario por Pérdidas de Energía en Valle (Q/kWh)	0.024146
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW)	27.753751

Fuente: Pliego tarifario EEGSA baja tensión con demanda CNEE Resolución Ago-Oct 2010

3. AUTOMATIZACION Y VARIADORES DE FRECUENCIA.

La automatización es un sistema donde se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.

3.1 Automatización

El alcance de la automatización va más allá que la simple mecanización de los procesos ya que ésta provee a operadores humanos mecanismos para asistirlos en los esfuerzos físicos del trabajo, la automatización reduce ampliamente la necesidad sensorial y mental del humano. La automatización como una disciplina de la ingeniería es más amplia que un mero sistema de control, abarca la instrumentación industrial, que incluye los sensores y transmisores de campo, los sistemas de control y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar y controlar las operaciones de plantas o procesos industriales.

Para mediados del siglo XX, la automatización había existido por muchos años en una escala pequeña, utilizando mecanismos simples para automatizar tareas sencillas de manufactura. Sin embargo el concepto solamente llegó a ser realmente práctico con la adición (y evolución) de las

computadoras digitales, cuya flexibilidad permitió manejar cualquier clase de tarea.

Computadoras especializadas, son utilizadas para leer entradas de campo a través de sensores y en base a su programa, generar salidas hacia el campo a través de actuadores. Esto conduce para controlar acciones precisas que permitan un control estrecho de cualquier proceso industrial.

Un sistema automatizado consta de dos partes principales: parte de mando y parte operativa.

3.1.1 La Parte operativa:

Es la parte que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación deseada. Los elementos que forman la parte operativa son los accionadores de las máquinas como motores, cilindros, compresores y los captadores como fotodiodos, finales de carrera etc.

a) Detectores y captadores

Como las personas necesitan de los sentidos para percibir, lo que ocurre en su entorno, los sistemas automatizados precisan de los transductores para adquirir información de:

- La variación de ciertas magnitudes del sistema.
- El estado físico de sus componentes.

Los transductores se pueden clasificar en función del tipo de señal que transmiten en:

- Transductor todo o nada: Suministran una señal binaria claramente diferenciada. Los finales de carrera son transductores de este tipo.
- Transductores numéricos: Transmiten valores numéricos en forma de combinaciones binarias. Los encoders son transductores de este tipo.
- Transductores analógicos: Suministran una señal continua que es fiel reflejo de la variación de la magnitud física medida.

b) **Accionadores y preaccionadores**

El accionador es el elemento final de control que, en respuesta a la señal de mando que recibe, actúa sobre la variable o elemento final del proceso.

Un accionador transforma la energía de salida del automatismo en otra útil para el entorno industrial de trabajo. Los accionadores pueden ser clasificados en eléctricos, neumáticos e hidráulicos.

Los accionadores más utilizados en la industria son: cilindros, motores de corriente alterna, motores de corriente continua, etc.

Los accionadores son gobernados por la parte de mando, sin embargo, pueden estar bajo el control directo de la misma o bien requerir algún preaccionamiento para amplificar la señal de mando. Esta pre-amplificación se traduce en establecer o interrumpir la circulación de energía desde la fuente al accionador.

Los preaccionadores disponen de parte de mando o de control que se encarga de conmutar la conexión eléctrica, hidráulica o neumática entre los cables o conductores del circuito de potencia.

3.1.2 La parte de mando

Suele ser un autómeta programable (tecnología programada), aunque hasta hace bien poco se utilizaban relés electromagnéticos, tarjetas electrónicas o módulos lógicos neumáticos (tecnología cableada). En un sistema de fabricación automatizado el autómeta programable esta en el centro del sistema. Este debe ser capaz de comunicarse con todos los constituyentes de sistema automatizado.

a) Tecnologías cableadas

Con este tipo de tecnología, el automatismo se realiza interconectando los distintos elementos que lo integran. Su funcionamiento es establecido por los elementos que lo componen y por la forma de conectarlos.

Esta fue la primera solución que se utilizó para crear autómatas industriales, pero presenta varios inconvenientes.

Los dispositivos que se utilizan en las tecnologías cableadas para la realización del automatismo son:

- a. Relés electromagnéticos:
- b. Módulos lógicos neumáticos
- c. Tarjetas electrónicas.

b) Tecnologías programadas

Los avances en el campo de los microprocesadores de los últimos años han favorecido la generalización de las tecnologías programadas. En la realización de automatismos. Los equipos realizados para este fin son:

- a. Los ordenadores.
- b. Los autómatas programables.

El ordenador, como parte de mando de un automatismo, presenta la ventaja de ser altamente flexible a modificaciones de proceso. Pero, al mismo tiempo, y debido a su diseño no específico para su entorno industrial, resulta un elemento frágil para trabajar en entornos de líneas de producción.

Un autómeta programable industrial es un elemento robusto diseñado especialmente para trabajar en ambientes de talleres, con casi todos los elementos del ordenador.

3.1.3 Objetivos de la automatización

- a) Mejorar la productividad de la empresa, reduciendo los costos de la producción y mejorando la calidad de la misma.
- b) Mejorar las condiciones de trabajo del personal, suprimiendo los trabajos de alto riesgo e incrementando la seguridad.
- c) Realizar las operaciones imposibles de controlar intelectual o manualmente
- d) Mejorar la disponibilidad de los productos, pudiendo proveer las cantidades necesarias en el momento preciso.
- e) Simplificar el mantenimiento de forma que el operario no requiera grandes conocimientos para la manipulación del proceso productivo.
- f) Integrar la gestión y producción.

3.2 Sensores y transductores

Se llama sensor al instrumento que produce una señal, usualmente eléctrica que refleja el valor de una propiedad, mediante alguna correlación definida (su *ganancia*).

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

Los transductores basados en fenómenos eléctricos o magnéticos, suelen tener una estructura general como podemos ver en la figura, en la cual podemos distinguir las siguientes partes:

- a) *Elemento sensor o captador*: es el encargado de convertir las variaciones de una magnitud física en variaciones de una magnitud eléctrica o magnética, que denominaremos habitualmente señal.
- b) *Bloque de tratamiento de señal*: si existe, suele filtrar, amplificar, linealizar y, en general, modificar la señal obtenida en el captador, por regla general utilizando circuitos electrónicos.

c) *Etapa de salida:* esta etapa comprende los amplificadores, interruptores, conversores de código, transductores y, en general todas aquellas partes que adaptan la señal a las necesidades de la carga exterior.

Atendiendo a la forma de codificar la magnitud medida podemos establecer una clasificación para los transductores en:

- a. *Analógicos:* aquellos que dan como salida un valor de tensión o corriente variable en forma continua dentro del campo de medida. Es frecuente para este tipo de transductores que incluyan una etapa de salida para suministrar señales normalizadas de 0-10V o 4-20mA
- b. *Digitales:* son aquellas que dan como salida una señal codificada en forma de pulsos o en forma de una palabra digital codificada en binario, BCD u otro sistema cualquiera.
- c. *Todo-nada:* indican únicamente cuando la variable detectada rebasa cierto umbral o límite. Pueden considerarse como un caso límite de los sensores digitales en el que se codifican solo dos estados.

Otro criterio de clasificación, relacionado con las señales de salida, es el hecho de que el captador propiamente dicho requiera o no una alimentación externa para su funcionamiento. En el primer caso se denomina sensor *pasivo* y en el segundo caso, *activos o directos*.

Los transductores los podemos clasificar según la magnitud física a detectar, existe una gran cantidad de sensores en la industria, en general,

los principios físicos en los que suelen estar basados los elementos sensores son los siguientes:

- a. Cambio de resistencia
- b. Electromagnetismo
- c. Piezoelectricidad,
- d. Efecto fotovoltaico,
- e. Termoelectricidad.

Más adelante se encuentra la explicación del funcionamiento de cada uno.

3.2.1 Características generales de los sensores.

Un transductor ideal sería aquel en que la relación entre la magnitud de salida y la variable de entrada fuese puramente proporcional y de respuesta instantánea e idéntica para todos los elementos de un mismo tipo. Sin embargo la respuesta real de los transductores nunca es del todo lineal, tiene un campo limitado de validez, suele estar afectada por perturbaciones del entorno exterior y tiene un cierto retardo a la respuesta.

Para definir el comportamiento real de los transductores se suelen comparar estos con un modelo ideal de comportamiento o con un transductor patrón y se define una serie de características que pone de manifiesto las desviaciones respecto a dicho modelo. Dichas características pueden agruparse en dos grandes bloques:

- a. *Características estáticas*: que describen la actuación del sensor en régimen permanente o con cambios muy lentos de la variable a medir.

- b. *Características dinámicas*: que describen la actuación del sensor en régimen transitorio, a base de dar respuesta temporal ante determinados estímulos estándar o base de identificar el comportamiento del transductor con sistemas estándar.

3.2.1.1 Características estáticas.

- a) *Campo de medida*: el campo de medida, es el rango de valores de la magnitud de entrada comprendida entre el máximo y el mínimo detectables por un sensor, con una tolerancia de error aceptable.
- b) *Resolución*: indica la capacidad del sensor para discernir entre valores muy próximos de la variable de entrada. Se mide por la mínima diferencia entre dos valores próximos que el sensor es capaz de distinguir.
- c) *Precisión*: la precisión define la máxima desviación entre la salida real obtenida de un sensor en determinadas condiciones en torno y de valor teórico de dicha salida que correspondería, en idénticas condiciones, según el modelo ideal específico como patrón. Se suele indicar en valor absoluto de la variable de entrada o en porcentaje sobre el fondo de escala de salida.

- d) *Repetibilidad*: característica que indica la máxima desviación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces un mismo valor de entrada, con el mismo sensor y en idénticas condiciones ambientales. Se suele expresar en porcentaje referido al fondo de escala y da una indicación del error aleatorio del sensor. Algunas veces se suministran datos de repetibilidad variando ciertas condiciones ambientales, lo cual permite obtener las derivas ante dichos cambios.
- e) *Linealidad*: se dice que un transductor es lineal, si existe una constante de proporcionalidad única que relaciona los incrementos de señal de salida con los correspondientes incrementos de señal de entrada, en todo el campo de medida. La no linealidad se mide por la máxima desviación entre la respuesta real y la característica puramente lineal, referida al fondo de escala.
- f) *Sensibilidad*: características que indica la mayor o menor variación de la salida por unidad de la magnitud de entrada. Un sensor es tanto más sensible cuanto mayor sea la variación de la salida producida por una determinada variación de entrada. La variación se mide, por la relación:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{magnitud de salida}}{\text{magnitud de entrada}}$$

Obsérvese que para transductores lineales esta relación es constante en todo el campo de medida,

mientras que en un transductor de respuesta no lineal depende del punto en que se mida

- g) *Ruido*: se entiende por ruido cualquier perturbación aleatoria del propio transductor o del sistema de medida, que produce una desviación de salida con respecto al valor teórico.
- h) *Histéresis*: se dice que un transductor presenta histéresis cuando, a igualdad de la magnitud de entrada, la salida depende de si dicha entrada se alcanza con aumentos en sentido creciente i en sentido decreciente. Se suele medir en términos de valor absoluto de la variable física o en porcentajes sobre el fondo de escala.

3.2.1.2 Características dinámicas.

La mayor parte de los transductores tienen un comportamiento dinámico que se puede asimilar a un sistema de primer o segundo orden, es decir, con una o, como máximo, dos constantes de tiempo dominantes. Los principales parámetros que caracterizan el comportamiento dinámico que un transductor serán, pues, los que se definen para estos tipos de sistemas. Solo cabe destacar que los transductores que responden a modelos de segundo orden suelen ser sistemas sobreamortiguados, es decir, sistemas en los que no hay rebasamiento en la

respuesta al escalón. A continuación se mencionara las características dinámicas mas importantes:

a) Velocidad de respuesta: la velocidad de respuesta mide la capacidad de un transductor para que la señal de salida siga sin retraso las variaciones de la señal de entrada. La forma de cuantificar este parámetro es a base de una o más constantes de tiempo, que suelen obtenerse de la respuesta escalón. Los parámetros más relevantes empleados en la definición de la velocidad de respuesta son los siguientes:

1) *Tiempo de retardo*: es el tiempo transcurrido desde la aplicación del escalón de entrada hasta que la salida alcanza el 10% de su valor permanente.

2) *Tiempo de subida*: es el tiempo transcurrido desde que la salida alcanza el 10% de su valor permanente hasta que llega por primera vez al 90% de dicho valor.

3) *Tiempo de establecimiento al 99%*: es el tiempo transcurrido desde la aplicación de un escalón de entrada hasta que la respuesta alcanza el régimen permanente, con una tolerancia de $\pm 1\%$.

4) *Constante de tiempo*: para un transductor con respecto de primer orden se puede determinar la constante de tiempo a base de medir el tiempo empleado para que la salida alcance el 63% de su

valor de régimen permanente, cuando a la entrada se le aplica un cambio en escalón.

- b) Respuesta frecuencial: Relación entre la sensibilidad y la frecuencia cuando la entrada es una excitación senoidal. Se suele indicar gráficamente mediante un gráfico de Bode.
- c) Estabilidad y Derivas: Características que indican la desviación de salida del sensor al variar ciertos parámetros exteriores distintos del que se pretende medir, tales como condiciones ambientales, alimentación, u otras perturbaciones.

3.2.2 Tipos de sensores y transductores de presión

Definición de transductor: un transductor es un dispositivo capaz de convertir el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada, ya sea en forma analógica o digital. Es una interpretación real de la palabra transductor, se puede decir, que cualquier dispositivo que convierta un tipo de movimiento mecánico generado por fuerzas de presión se convierte en una señal eléctrica o electrónica para utilizarse en la medición o el control.

Los transductores de presión suelen estar basados en la deformación de un elemento estático, cuyo movimiento bajo la acción del fluido es detectado por un transductor de pequeños desplazamientos, del que se obtiene una señal eléctrica proporcional a la presión. Los transductores de presión más frecuentes son los de diafragma o membrana. El diafragma consiste en una pared delgada que se deforma bajo efecto de la presión. Si se mide dicha

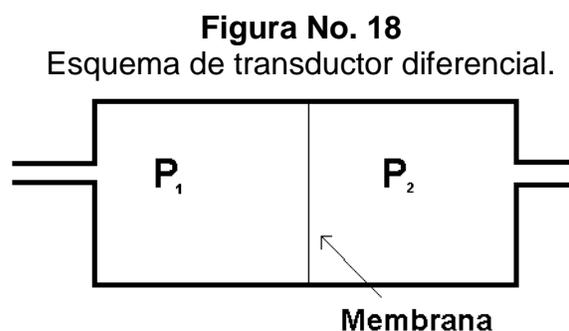
deformación mediante un puente de galgas extensométricas, o un transformador diferencial, se obtiene una medida indirecta de la presión.

Para medir la presión se utilizan sensores que están dotados de un elemento sensible a la presión y que emiten una señal eléctrica al variar la presión o que provocan operaciones de conmutación si esta supera un determinado valor límite. Es importante tener en cuenta la presión que se mide, ya que pueden distinguirse los siguientes tipos:

- 1) Presión absoluta
- 2) Presión diferencial
- 3) Sobrepresión

a) Transductores de presión diferencial.

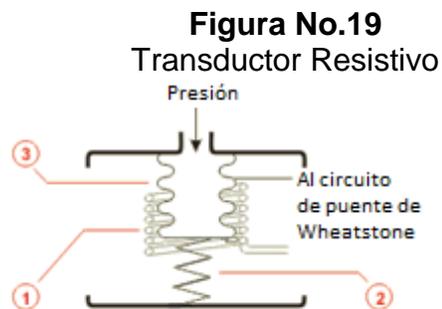
Los transductores de presión diferencial son utilizados para convertir la presión diferencial obtenida en el neumotacógrafo en señales eléctricas. Estos dispositivos tienen una cavidad hueca separada por una membrana como se muestra en la Figura No 18.



Fuente: <http://www.nib.fmed.edu.uy/Lucerna.pdf> 2004. Pág 56

b) Transductores Resistivos:

Consiste en un elemento elástico que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arroyados a una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia: potenciómetros de grafito, de resistencia bobinada, de película metálica y de plástico moldeada.



Referencias:

- 1) Resistencia
- 2) Resorte
- 3) Fuelle

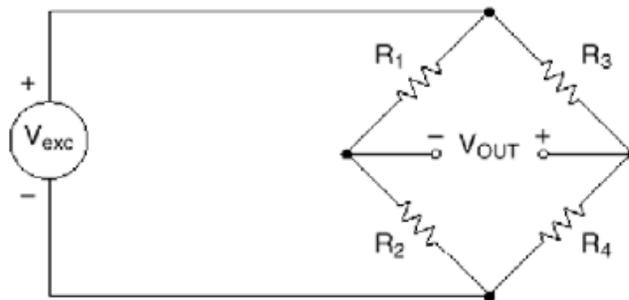
Fuente: XIII SEMINARIO DE ING. BIOMÉDICA 2004, Fac. de Med. e Ing., Univ la República, Montevideo, Uruguay. Pag 69

c) Traductor piezoresistivo

En los transductores piezoresistivo se coloca de una a cuatro galgas extensiométricas. Cuando hay diferencia de presión a ambos lados de la membrana, se produce un esfuerzo mecánico sobre está y las galgas extensiométricas experimentan variación de la resistividad. A este cambio de resistividad se le conoce como efecto piezoresistivo. La variación de resistencia (R) de una galga se puede modelar como: $\frac{dR}{R} = k\sigma$ donde σ es el estiramiento

relativo de la galga ($\sigma = \Delta l/l$), l es el largo y k se define como el factor de galga que depende del material en el cual está construida la galga). Para el caso en que el material de la galga sea cilicio, $k \approx 5 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$. Para conocer la variación de resistencia se configura el circuito de forma que sea un puente de Wheatstone como se muestra en la figura No. 20.

Figura No.20
Puente de Wheatstone



Fuente: XIII SEMINARIO DE ING. BIOMÉDICA 2004, Fac. de Med. e Ing., Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Pag- 70

Si el valor de las resistencias es conocido, al variar la resistencia de la galga (R_1) el voltaje del puente es:

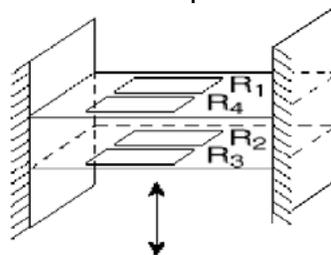
$$V_{out} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{exc}$$

Un problema, además de la alinealidad, es que las galgas varían su resistencia con la temperatura. Para independizar de estos parámetros se colocan cuatro galgas en full duplex como se muestra en la Figura No. 21. Además esta configuración maximiza la salida V_{out} :

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{R} V_{exc}$$

Se supone que las variaciones de las resistencias de las galgas es la misma ($R \pm \Delta R$).

Figura No. 21
Esquema Full Duplex de Galgas.



Fuente: XIII SEMINARIO DE ING. BIOMÉDICA 2004,
Fac. de Med. e Ing., Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, pag. 72

d) Transductores magnéticos:

Se clasifican en dos grupos según el principio de funcionamiento.

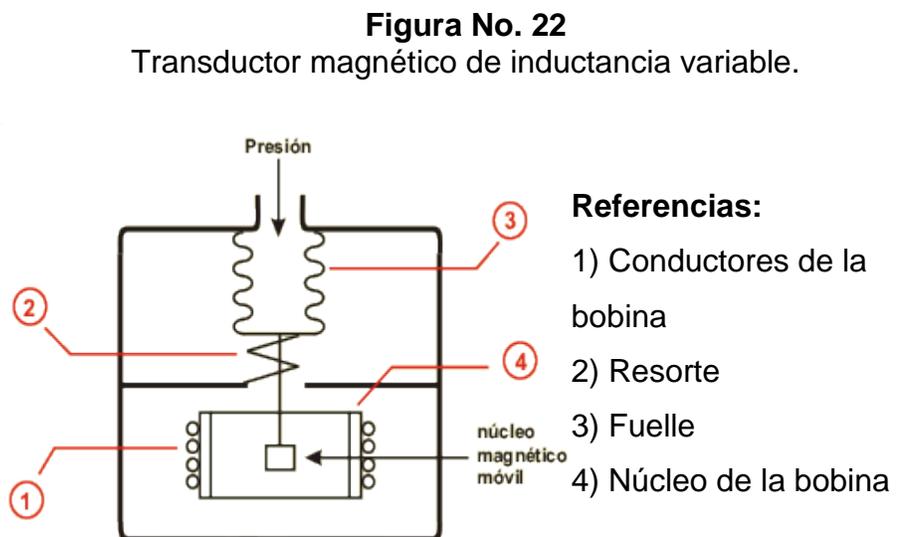
- 1) Transductores de inductancia variable: en los que el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de ésta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina. El devanado de la bobina se alimenta con una corriente alterna y la F.E.M., de autoinducción generada se opone a la F.E.M., de alimentación, de tal modo, que al ir penetrando el núcleo móvil dentro de la bobina, la corriente presente en el circuito se va reduciendo por aumentar la F.E.M., de autoinducción.

- 2) Los transductores de reluctancia variable: consiste en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético.

e) Transductores magnéticos de presión:

Existen dos grupos:

- 1) Transductores de inductancia variable. El desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de ésta en forma casi proporcional a la proporción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina.

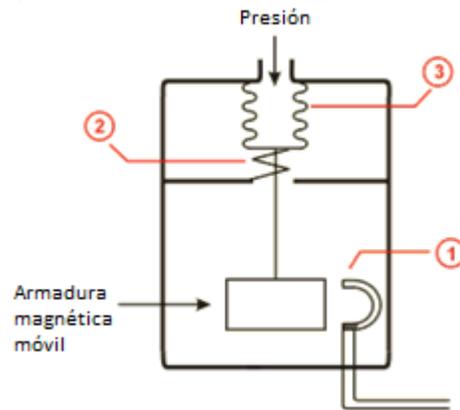


Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos/aire/aire.shtml>. Pág. 67

- 2) Transductores de reluctancia variable. Consiste en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con la cual al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético, dando lugar a una corriente magnética inducida.

Figura No. 23

Transductores magnéticos de reluctancia variable



Referencias:

- 1) Imán permanente
- 2) Resorte
- 3) Fuelle

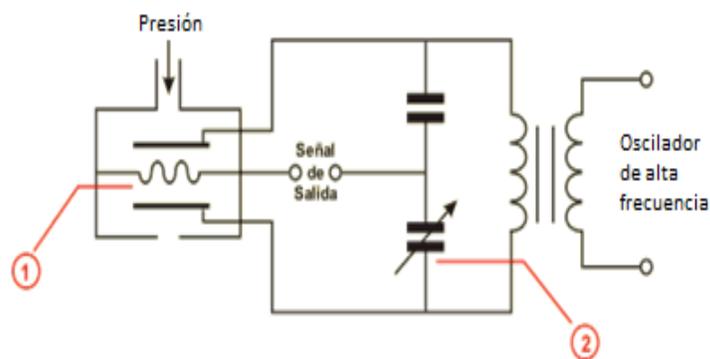
Fuente: Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos/aire/aire.shtml>. Pág 78

f) Transductores capacitivos:

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador, al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas.

Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeño tamaño y de construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuados para medidas estáticas y dinámicas.

Figura No. 24
Transductores Capacitivos



Referencias:

- 1) Capacitor que varía con la presión
- 2) Capacitor para ajuste de cero

Fuente: Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos/aire/aire.shtml>. Pág.89

g) Transductores Piezoeléctricos:

Los elementos piezoeléctricos, son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son: el Cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150 °C en servicio continuo y de 230 °C en servicio intermitente.

h) Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma:

Trabajan en forma diferencial entre la presión atmosférica y la del proceso. Pueden estar, compensados con relación a las presiones atmosféricas y calibrados en unidades absolutas. Al ser dispositivos mecánicos, las fuerzas disponibles a presiones del gas muy bajo son tan pequeños que estos instrumentos no son adecuados para la medidas de alto vacío, están limitado a valores de 1 mm Hg abs. Pueden llegar a acoplar dos transductores eléctricos del tipo de galga extensométrica o capacitivos.

i) Transductores térmicos:

Se basan en el principio de la proporcionalidad entre la energía disipada desde la superficie caliente de un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas ambiente cuando el gas está bajo presiones absoluto.

El transductor térmico de termopar contiene un filamento en V que lleva incorporado un pequeño termopar. La F.E.M., del termopar indica la temperatura del filamento y por lo tanto señala el vacío del ambiente.

j) Transductores bimetálicos

Utiliza espiral bimetálica calentada por una fuente de tensión estabilizada. Cualquier cambio en la presión produce una deflexión de la espiral, que a su vez está acoplada a un índice que señala en la escala el vacío. Su intervalo de medida es de $1 - 10^{-3}$ mmHg.

k) Transductores de ionización

Se basan en la formación de los iones que se producen en las colisiones que existen entre moléculas y electrones (o bien partículas alfa en el tipo de radiación). La velocidad de formación de estos iones, es decir la corriente iónica, varía directamente con la presión.

l) Transductores de filamento caliente

Consiste en tubo electrónico con un filamento de tungsteno rodeado por una rejilla en forma de bobina, la cual a su vez está envuelta por una placa colectora. Los electrones emitidos por el filamento caliente se aceleran hacia la rejilla positiva, pasan a su través y, en su camino hacia la placa colectora de carga negativa, algunas colisionan con moléculas de gas.

m) Transductor de cátodo frío:

Se basa en el principio de la medida de una corriente iónica producida por una descarga de alta tensión. Los electrones desprendidos del cátodo toman un movimiento en espiral al irse moviendo al través de un campo magnético en su camino hacia el ánodo. El movimiento en espiral da lugar a que en el camino libre medido entre electrones sea mayor que la distancia entre electrodos.

n) Transductores de radiación:

En el transductor de radiación, una fuente de radio sellada, producen partículas alfa que ionizan las moléculas del gas en la cámara de vacío y que por lo tanto, es proporcionada la presión total del sistema.

3.3 Motores de inducción.

Los motores asíncronos o de inducción, son prácticamente motores trifásicos. Están basados en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio. Están formados por dos armaduras con campos giratorios coaxiales: una es fija, y la otra móvil. También se les llama, respectivamente, estator y rotor.

El devanado del rotor, que conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator conectado directamente, consiste de conductores de cobre o aluminio vaciados en un rotor de laminaciones de acero. Se instalan anillos terminales de cortocircuito en ambos extremos de la “jaula de ardilla” o bien en uno de los extremos en el caso del rotor devanado.

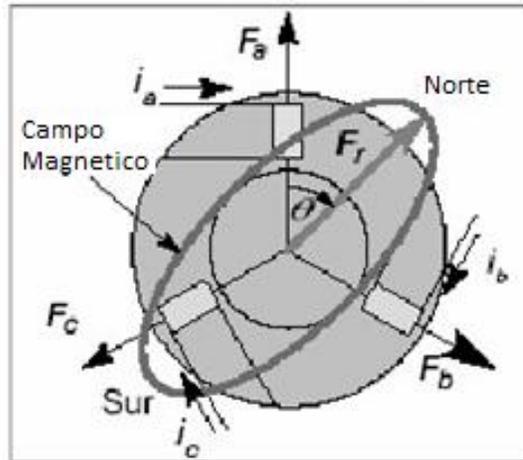
Los motores de inducción de rotor devanado son menos utilizados, debido a su mayor costo, y a que requieren de más mantenimiento que los de jaula de ardilla.

3.3.1 Producción del campo magnético rotatorio.

Debido a que el sistema eléctrico industrial utiliza fuentes trifásicas de energía, la máquina de inducción se construye normalmente con tres devanados, distribuidos y desfasados espacialmente 120° . En cada una de las tres bobinas desfasadas espacialmente, se inyectan corrientes alternas senoidales desfasadas en el tiempo 120° unas de otras.

Cada bobina produce un campo magnético estático en el espacio. La amplitud de este campo se encuentra en la dirección del eje magnético de la bobina y varía senoidalmente en el tiempo. La combinación de los campos pulsantes producidos por las tres corrientes desfasadas temporalmente, circulando por las tres bobinas desfasadas espacialmente, se traduce en un campo magnético distribuido senoidalmente en el espacio que rota a la velocidad de variación de las corrientes en el tiempo.

Figura No. 25
Distribución senoinal del campo magnético rotatorio



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos/aire/aire.shtml>. Pág. 90

Puesto que el periodo o intervalo de tiempo de la variación senoidal de la corriente es el mismo en los conductores, la velocidad del campo magnético rotatorio (S), varía directamente con la frecuencia (f), pero inversamente con el número de polos (P):

$$S = 120 f / P = 120 f / 2n$$

Ya que el número de polos sólo depende de n, o sea el devanado que se emplee, la velocidad es en realidad una función de la frecuencia.

3.3.1.1 Desarrollo del par inducido.

Cuando se aplican al estator un conjunto trifásico de voltajes, se generan un conjunto de corrientes trifásicas que producen un campo magnético BS que rota en dirección contraria a las manecillas del reloj. Éste induce voltaje en las barras del rotor, y este voltaje está dado por la ecuación:

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l$$

En donde v es la velocidad de la barra, relativa al campo magnético; B es el vector de densidad de flujo magnético; y l , la longitud del conductor en el campo magnético.

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator (B_s) induce voltaje en una barra del rotor. El flujo magnético del rotor produce un campo magnético del rotor B_R . El par en la máquina, T_{ab} (T_{ind}) inducido, está dado por:

$$T_{ind} = k B_R \times B_S$$

La dirección es en sentido contrario a las manecillas del reloj, por lo tanto el rotor se acelera en esa dirección. En operación normal, los campos magnéticos del estator y del rotor giran a la velocidad sincrónica, mientras que el rotor gira a una velocidad menor.

3.3.2 Deslizamiento de la máquina de inducción

El deslizamiento de una máquina de inducción, se define como la velocidad relativa entre el campo magnético producido por las corrientes inyectadas en el estator y la velocidad mecánica del rotor, por unidad de la velocidad del campo:

$$s = \frac{(S - S_r) \times 100}{S}$$

Siendo s el porcentaje de deslizamiento para fines de cálculo. S es la velocidad síncrona ($120f/P$) en rpm del campo magnético rotatorio producida por el estator; y S_r es la velocidad del rotor en rpm.

En general, a la velocidad del campo se le denomina velocidad síncrona de la máquina, y el deslizamiento indica qué tan cerca se encuentra la máquina de esta velocidad. Si el rotor de la máquina gira a una velocidad mayor que la síncrona, el deslizamiento se hace negativo. Cuando se conocen todos los parámetros del modelo de una máquina de inducción y la fuente de alimentación, el deslizamiento determina el punto de operación. Por esta razón se utiliza esta variable para definir el estado de la máquina.

3.3.3 Circuito equivalente de la máquina de inducción.

El circuito equivalente de un motor de inducción es muy similar al de un transformador, debido a la acción de transformación que ocurre al inducirse corrientes en el rotor, desde el estator.

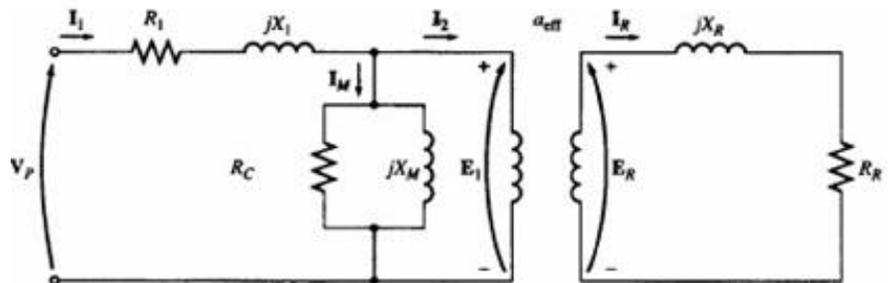
3.3.3.1 El modelo transformador de un motor de inducción.

En la figura 26 se muestra un circuito equivalente transformador, por fase, de un motor de inducción. La

resistencia del estator es R_1 y la reactancia de dispersión es X_1 . E_1 es el voltaje primario del estator, acoplado al secundario E_R mediante un transformador ideal con relación de vueltas a_{eff} . El voltaje E_R producido en el rotor ocasiona un flujo de corriente en el rotor. R_C es el componente de pérdidas en el núcleo y jX_M se refiere a la reactancia de magnetización, R_R y jX_R son las impedancias del rotor. Asimismo I_1 , constituye la corriente de línea, I_M la corriente de magnetización. I_R es el flujo de corriente en el rotor e I_2 es la corriente rotórica.

Figura No. 26

Modelo transformador de un motor de inducción con el rotor y el estator conectados por un transformador ideal de relación de vueltas a_{eff} .



Fuente: Chapman Stephen, **Máquinas eléctricas**, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000, Pág .109

3.3.3.2 Circuito modelo del rotor.

Cuanto mayor sea el movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, mayor será el voltaje resultante en el rotor y la frecuencia del rotor. El mayor movimiento relativo ocurre cuando el rotor se

encuentra estacionario, condición llamada de rotor detenido o de rotor bloqueado, de modo que en esta condición se inducen el máximo voltaje y la máxima frecuencia del rotor. El mínimo voltaje (0 V) y la mínima frecuencia (0Hz) ocurren cuando el motor se mueve con la misma velocidad que el campo magnético del estator, caso en que no hay movimiento relativo.

El voltaje y la frecuencia del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del rotor, por lo que el voltaje y la frecuencia inducidos para cualquier deslizamiento son:

$$E_R = sE_{R0}$$

$$f_r = sf_e$$

En donde E_{R0} es el voltaje a rotor bloqueado, s es el deslizamiento y f_e es la frecuencia de línea.

La reactancia del rotor (X_R) no es constante como lo es la resistencia (R_R); por lo que depende de la inductancia (L_R), de la frecuencia (ω_r) y de la corriente del rotor:

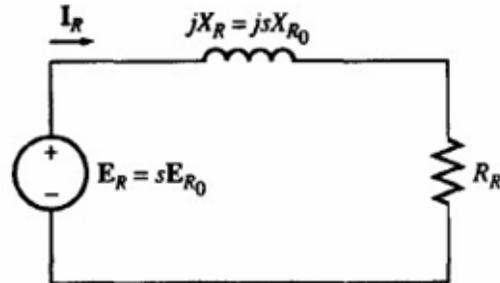
$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$X_R = 2\pi s f_e L_R = s (2\pi f_e L_R) = sX_{R0}$$

En donde X_{R0} es la reactancia a rotor bloqueado.

Figura No.27
Circuito modelo del rotor



Fuente: Chapman Stephen, Máquinas eléctricas, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000, Pág. 105

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

Finalmente obtenemos el circuito equivalente del rotor en la figura 27. El flujo de corriente en el rotor se calcula como:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}}$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}}$$

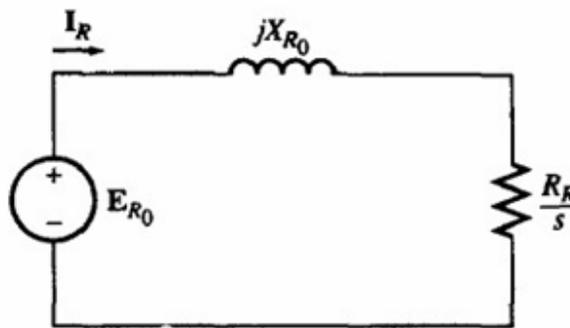
De esta última ecuación, es posible calcular la impedancia equivalente del rotor; desde el punto de vista de que se encuentra alimentada por la fuente de voltaje E_{R0} :

$$Z_{R,eq} = \frac{R_R}{s} + jX_{R0}$$

Para obtener el circuito equivalente del rotor en el que el voltaje E_{R0} es constante y la impedancia del rotor contiene todos los efectos de la variación del deslizamiento (figura 28).

Figura No. 28

Circuito modelo del rotor con todos los efectos de la frecuencia (deslizamiento) concentrados en la resistencia R_R



Fuente: Chapman Stephen, **Máquinas eléctricas**, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000, Pág. 76

3.3.4 Circuito equivalente final.

Para obtener el circuito equivalente por fase, es necesario referir en el estator, el modelo del rotor. Si la relación de vueltas de un motor de inducción es a_{eff} , el voltaje transformado es:

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0}$$

y la corriente e impedancia rotóricas son:

$$I_2 = I_R / a_{\text{eff}}$$

$$Z_2 = a_{\text{eff}}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right)$$

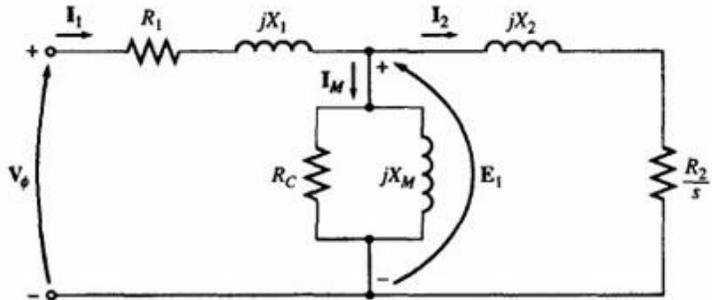
y si se definen:

$$X_2 = a_{\text{eff}}^2 X_{R0}$$

Obtenemos finalmente el circuito equivalente por fase de la figura 29.

Figura No. 29

Circuito equivalente por fase en un motor de inducción



Fuente: Chapman Stephen, **Máquinas eléctricas**, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000, Pág. 140

3.3.5 Característica par-velocidad del motor de inducción.

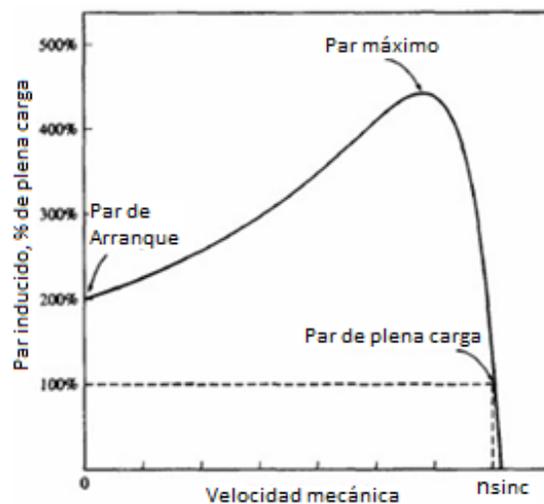
En la figuras 1.6 y 1.7 se presentan las curvas características

par-velocidad del motor de inducción. La información que proveen, se resume a continuación:

- a) El par inducido del motor es cero a la velocidad sincrónica
- b) La curva par-velocidad es aproximadamente lineal entre vacío y plena carga; ya que cuando crece el deslizamiento, crecen linealmente: la corriente rotórica, el campo magnético del rotor, y el par inducido.

Figura No. 30

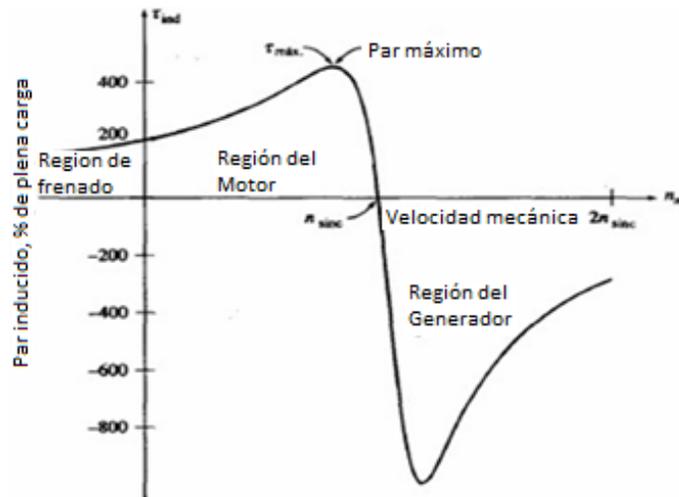
Curva característica típica de un motor de inducción



Fuente: Chapman Stephen, **Máquinas eléctricas**, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000, Pag139

Figura No.31

Curva característica par-velocidad de un motor de inducción



Fuente: Chapman Stephen, Máquinas eléctricas, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000, Pag. 130

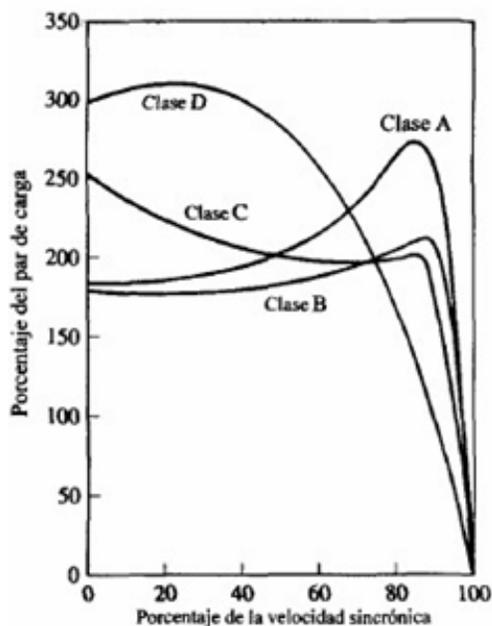
Muestra los rangos extendidos de operación (región de frenado y región de regeneración).

- c) El par máximo o de desviación, equivale a 2 ó 3 veces el par nominal y no puede ser excedido.
- d) El par de arranque es ligeramente mayor al par de plena carga
- e) Para un deslizamiento dado, el par inducido varía con el cuadrado del voltaje aplicado.
- f) La máquina de inducción opera como generador cuando la velocidad del rotor es mayor que la sincrónica. Entonces la dirección del par inducido se invierte, convirtiendo potencia mecánica en potencia eléctrica.
- g) Para frenar con rapidez el motor, se conmutan dos fases, que significa invertir la dirección de rotación del campo magnético.

3.3.6 Clases de diseño de motores de inducción.

La National Electric Manufacturers Association (NEMA) y la International Electrotechnical Comision (IEC), han desarrollado un sistema de identificación mediante letras para los motores comerciales, según las curvas características par-velocidad para cada diseño:

Figura No. 32
Curvas características típicas para diferentes diseños de motores



Fuente: Chapman Stephen, **Máquinas eléctricas**, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000. Pag. 145

- a) **Diseño clase A.** Es un motor de jaula de ardilla para usarse a velocidad constante. Sus principales características son:
- 1) Buena capacidad de disipación de calor.
 - 2) Alta resistencia y baja reactancia al arranque.
 - 3) El par máximo está entre 200% y 300% del par de plena

carga y ocurre a un bajo deslizamiento.

- 4) Aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal.
- 5) Presenta la mejor regulación de velocidad, entre el 2 y 4%.
- 6) Desafortunadamente su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal.
- 7) Han sido reemplazados por los motores de diseño clase B en los últimos años.
- 8) Se utilizan en ventiladores, sopladores, bombas, tornos, etc.

b) Diseño clase B. Se les llama motores de propósito general y a este tipo pertenecen la mayoría de los motores con rotor de jaula de ardilla. A continuación se resumen sus características:

- 1) Par de arranque normal, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento.
- 2) Produce casi el mismo par de arranque que el diseño anterior.
- 3) El par máximo es mayor o igual al 200% el par de carga nominal.
- 4) Deslizamiento bajo (menor del 5%).
- 5) Se prefieren sobre los diseños de clase A por requerir poca corriente de arranque.

c) Diseño clase C. Alto par de arranque (entre 2 y 2.5 veces el nominal) con bajas corrientes de arranque (de 3.5 a 5 veces la nominal).

- 1) Son construidos con un rotor de doble jaula (más costosos).
- 2) Bajo deslizamiento (menos del 5%) a plena carga.
- 3) Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente.
- 4) Cuando se emplea con cargas pesadas, se limita la disipación térmica del motor, ya que la mayor parte de la

corriente se concentra en el devanado superior.

- 5) Tiende a sobrecalentarse con arranques frecuentes.
- 6) Se utilizan para cargas con alto par de arranque, como en bombas, compresores y transportadores.

d) Diseño clase D

- 1) También conocidos como de alto par y alta resistencia
- 2) Alto par de arranque (275% o más del nominal) y baja corriente de arranque
- 3) Alto deslizamiento a plena carga.
- 4) La alta resistencia del rotor desplaza el par máximo hacia una velocidad muy baja.
- 5) Diseñado para servicio pesado de arranque, en especial grandes volantes utilizados en troqueladoras o cortadoras.

También existen las clases E y F, llamados motores de inducción de arranque suave, pero obsoletos hoy en día.

3.3.7 Tendencias en el diseño de motores de inducción.

El motor de inducción moderno se construyó entre 1888 y 1895, cuando Nicola Tesla recibió la patente de sus ideas sobre los motores de inducción. Poco después se introdujo el rotor de jaula de ardilla, y hacia 1896 estuvieron disponibles en el mercado motores de inducción trifásicos reconocidos y funcionales.

Los esfuerzos de mejoramiento de diseño en aquella época hasta 1970, eran enfocados a disminuir el costo de construcción: calidad de los aceros, técnicas de fundición, etc. Este enfoque se debió principalmente a que la electricidad no era tan costosa; por lo tanto, el criterio a seguir para comprar un motor, era su costo directo.

Desde el ascenso del costo de los combustibles en 1973; el costo de operación de máquinas ha sido cada vez más importante, dejando a un lado los costos de instalación. Por lo que el nuevo énfasis ha sido la eficiencia del motor .

Para aumentar la eficiencia de los motores se utilizan técnicas conducentes a reducir las pérdidas en el cobre, reducir la densidad de flujo magnético para reducir las pérdidas en el núcleo. Reducir la temperatura de operación utilizando más acero en el estator, reducir las corrientes parásitas, etc.

3.3.8 Dos técnicas de control de velocidad

El desarrollo de sistemas para controlar la velocidad en motores de inducción se ha venido dando desde hace muchos años. Se da una breve explicación de algunos de estos métodos, para de ahí fundamentar la decisión que se ha tomado para el desarrollo del proyecto. Básicamente

existen dos técnicas para variar la velocidad de un motor de inducción.

3.3.8.1 Variar el deslizamiento del motor para una carga dada

En las figuras No. 30 y No. 31 se puede observar que el par inducido del motor es cero a la velocidad sincrónica. La curva par-velocidad es aproximadamente lineal entre vacío y plena carga. En este rango, la resistencia del rotor es mucho mayor que su reactancia, por lo tanto la corriente, el campo magnético del rotor y el par inducido crecen linealmente cuando crece el deslizamiento. Existe un par máximo posible que no puede ser excedido. Este par, llamado par máximo o par de desviación, equivale a 2 ó 3 veces el par nominal de plena carga del motor.

El par inducido en el motor, para un deslizamiento dado, varía con el cuadrado del voltaje aplicado. En base a éstas características es cómo es posible controlar la velocidad del motor de inducción.

El método de variar el deslizamiento del motor para una carga dada se puede implementar

cambiando el voltaje en la línea o cambiando la resistencia del rotor. En el primer caso la velocidad del motor puede ser controlada en un rango limitado.

En el segundo caso, si se cambia la resistencia del rotor; se reduce en gran manera la eficiencia de la máquina.

3.3.8.2 Variar la velocidad sincrónica.

En esta técnica, tal como su nombre lo indica, se hace variar la velocidad sincrónica (n_{sinc}) del motor, se varía la velocidad de los campos magnéticos del rotor y del estator. Se logra variar la velocidad del motor debido a que la velocidad del rotor siempre permanece cerca de la velocidad de sincrónica (n_{sinc}). Este tipo de control se puede llevar a cabo mediante dos maneras que se explican a continuación.

a) Variando la frecuencia eléctrica

Los motores de inducción rotan a una velocidad que es un poco menor que la velocidad sincrónica del campo rotatorio. La velocidad sincrónica del campo rotatorio está determinada por el número de polos del devanado del estator y de la frecuencia del voltaje CA aplicado.

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120f}{p}$$

Donde: f es la frecuencia en hertz del voltaje aplicado al estator y p es el número de polos del devanado del estator.

En variadores de velocidad electrónicos para motores de CA, la frecuencia del voltaje aplicado al estator se varía para cambiar la velocidad sincrónica. El cambio en la velocidad sincrónica produce entonces un cambio en la velocidad del eje del motor. Se obtiene el voltaje CA de frecuencia variable para el sistema operador del motor CA cambiando potencia CD en potencia CA de frecuencia variable. El circuito que efectúa este trabajo se llama inversor.

Utilizando control de frecuencia variable, es posible ajustar la velocidad del motor por encima o por debajo de la velocidad base. Un controlador de frecuencia variable para motor de inducción, diseñado adecuadamente, puede ser muy flexible y puede controlar la velocidad de un motor de inducción sobre un rango de velocidad que va desde cero, hasta cerca del doble de la velocidad base. Sin embargo, es importante respetar ciertos límites de voltaje y par sobre el motor

cuando varía la frecuencia para asegurar una operación confiable.

b) Cambiar el número de polos de la máquina

Se basa en el hecho de que el número de polos de los devanados del estator de un motor de inducción se puede cambiar con facilidad en relación 2:1 con efectuar cambios en la conexión de las bobinas. Como método de control de velocidad sólo puede utilizarse para producir velocidades relativamente fijas para un motor de inducción cuya velocidad varía sólo ligeramente (del 2% al 8%), desde vacío hasta plena carga.

Por lo tanto, se requiere de un motor especial que posea los devanados necesarios y las terminales llevadas al exterior del estator para intercambio de polos. Aun así, no se puede conseguir un control gradual de la velocidad. Las velocidades obtenidas están en relación 2:1 y no se pueden conseguir velocidades intermedias mediante los procedimientos de conmutación.

Este tipo de control se puede implementar mediante las técnicas de polos consecuentes, y

devanados de estator múltiples.

3.3.8.3. Elección del método a usar para el variador de velocidad

En base al principio de operación de cada uno de los métodos para el control de velocidad en motores de inducción descritos, se hacen las siguientes observaciones.

a) Método de varia el deslizamiento del motor

- a) Confinado a menos de 5% de deslizamiento.
- b) La variación de velocidad en ese rango es más o menos directamente proporcional a la carga sobre el eje del motor.
- c) La eficiencia del motor es muy pobre.
- d) Llevando a cabo este método mediante el cambio de voltaje de la línea, la velocidad puede ser controlada en un rango muy limitado.
- e) Si se lleva a cabo cambiando la resistencia del motor, se reduce la eficiencia de éste, además que el motor solo se puede utilizar en periodos cortos.

b) Método de variar la velocidad Sincrónica

Si se cambia el número de polos de la máquina tenemos que:

- a) Se requiere un motor especial.
- b) No puede conseguirse un control gradual y continuo de la velocidad

Si el cambio del número de polos en el motor de inducción se lleva a cabo por el método de polos consecuentes, se observa que para cambiar la velocidad, las velocidades deben estar en relación 2:1. Ésta última limitación se aminora si se emplean estatores de devanados múltiples. Éstos devanados deben tener diferente número de polos, de los cuales sólo se debe energizar uno en cada oportunidad. Aun así, globalmente ésta no parece la mejor solución, pues además de aumentar el costo del motor, aun con esto no se puede tener una variación gradual de la velocidad.

c) Método de control de variación de la frecuencia eléctrica

Finalmente, se tiene el principio de control variación de la frecuencia eléctrica. Éste método es usado

ampliamente en la industria, y por la naturaleza del método y sus efectos sobre el motor, se observa que:

- a) No se necesitan hacer cambios físicos en las conexiones del motor
- b) El motor controlado operará siempre en sus condiciones óptimas de funcionamiento
- c) Menor mantenimiento
- d) Permite un control gradual de la velocidad
- e) Es posible ajustar la velocidad del motor por encima o debajo de la velocidad base.

Después de analizar las principales características de operación y construcción de cada método, se decidió emplear el principio de operación mediante la variación voltaje/frecuencia, porque permite un control gradual de la velocidad y es posible ajustar la velocidad del motor por encima o debajo de la velocidad base.

Actualmente, los fabricantes de equipos variadores de velocidad basan en este método el principio de operación de sus productos. Para esto desarrollan sus propios componentes, como microcontroladores especiales, logrando con ellos variar y controlar la velocidad de un motor con plena seguridad. Sin embargo, gran parte de los motores de corriente alterna que se encuentran operando en la industria, no necesariamente están siendo controlados bajo éste sistema de control. Sus condiciones de operación así como los métodos utilizados para su

variación de velocidad dependen de factores como la fecha de planeación y construcción de instalaciones, el presupuesto con que se contó para construir éstas, y la disponibilidad para la actualización de sus equipos.

3.4 Variador de frecuencia.

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

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:
$$RPM = \frac{120f}{p}$$

Donde

RPM = Revoluciones por minuto

f = frecuencia de suministro AC (hertz)

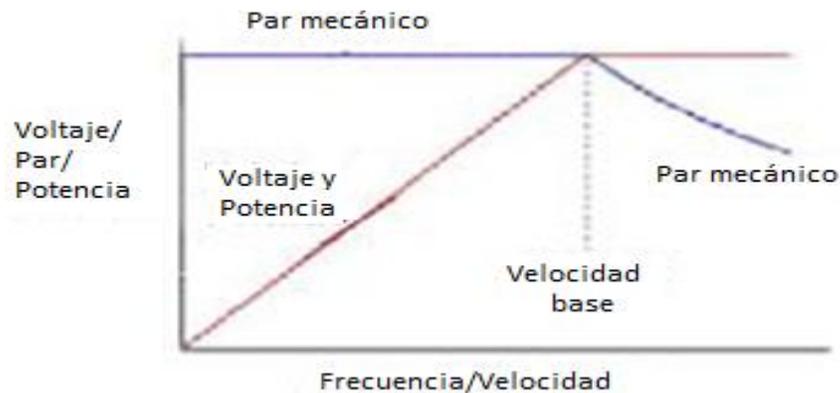
p = Número de polos (adimensional)

Las cantidades de polos más frecuentemente utilizadas en motores síncronos o en Motor asíncrono son 2, 4, 6 y 8 polos que, siguiendo la ecuación citada resultarían en 3000 RPM, 1500 RPM, 1000 RPM y 750 RPM respectivamente para motores sincrónicos únicamente, funcionando en 60Hz y en CA.

En los motores asíncronos las revoluciones por minuto son ligeramente menores por el propio asincronismo que indica su nombre. En estos se produce un desfase mínimo entre la velocidad de rotación (RPM) del rotor (velocidad "real" o "de salida") comparativamente con la cantidad de RPMs del campo magnético (las cuales si deberían cumplir la ecuación arriba mencionada tanto en Motores síncronos como en motores asíncronos) debido a que sólo es atraído por el campo magnético exterior que lo aventaja siempre en velocidad (de lo contrario el motor dejaría de girar en los momentos en los que alcanzase al campo magnético).

Un sistema de variador de frecuencia (VFD) consiste generalmente en un motor AC, un controlador y un interfaz operador.

Figura No. 33
Relación par-velocidad para un variador de velocidad



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Variador de frecuencia](http://es.wikipedia.org/wiki/Variador_de_frecuencia). Pág 45

3.4.1 Tipos de Variadores eléctrico-electrónicos

Existen cuatro categorías de variadores de velocidad eléctrico-electrónicos:

- Variadores para motores de CC
- Variadores de velocidad por corrientes de Eddy
- Variadores de deslizamiento
- Variadores para motores de CA conocidos como variadores de frecuencia.

a) Variadores para motores de CC

Estos variadores permiten controlar la velocidad de motores de Corriente continua serie, derivación, compuesto y de imanes permanentes. Para el caso de cualquiera de las máquinas anteriores se cumple la siguiente expresión:

$$V_T = K * FM * Nm$$

Donde:

V_T Voltaje terminal (V).

FM Flujo magnético producido por el campo (Wb)

Nm Velocidad mecánica (rpm).

K = Constante determinada por el diseño del devanado, que está dada por:

$$K = \frac{\text{Polos } Ca}{2\pi m}$$

Donde:

Ca en el número total de conductores en el devanado del inducido

m es el número de trayectorias paralelas a través del devanado.

Despejando la velocidad mecánica, se obtiene:

$$Nm = V_T / K * FM$$

Entonces, en la formula anterior puede observarse que la velocidad mecánica de un motor de CC es directamente proporcional al voltaje terminal (V_T) e inversamente proporcional al flujo magnético (FM), el cual a su vez depende de la corriente de campo (IF). Aprovechando esta situación es que este tipo de variadores puede controlar la velocidad de un motor de CC: controlando su voltaje terminal, o bien, manipulando el valor de la corriente de campo.

b) Variadores por corrientes de Eddy

Las corrientes de Eddy se producen cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable, o viceversa. El movimiento

relativo causa una circulación de electrones, o corriente inducida dentro del conductor. Estas corrientes circulares de Eddy crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado. Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o mayor la conductividad del conductor, o mayor la velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes de Eddy y los campos opositores generados.

Un variador de velocidad por corrientes de Eddy consta de un motor de velocidad fija y un embrague de corrientes de Eddy. El embrague contiene un rotor de velocidad fija (acoplado al motor) y un rotor de velocidad variable, separados por un pequeño entrehierro. Se cuenta, además, con una bobina de campo, cuya corriente puede ser regulada, la cual produce un campo magnético que determinará el par mecánico transmitido del rotor de entrada al rotor de salida. De esta forma, a mayor intensidad de campo magnético, mayor par y velocidad transmitidos, y a menor campo magnético menores serán el par y la velocidad en el rotor de salida. El control de la velocidad de salida de este tipo de variadores generalmente se realiza por medio de lazo cerrado, utilizando como elemento de retroalimentación un tacómetro de CA.

c) Variadores de deslizamiento

Este tipo de variadores se aplica únicamente para los motores de inducción de rotor devanado. En cualquier un motor de inducción, la

velocidad mecánica (nM) puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$N_m = 120 * f * (1 - s) / P$$

Donde s es el deslizamiento del motor, cuyo valor oscila entre 0 y 1. De esta forma, a mayor deslizamiento, menor velocidad mecánica del motor. El deslizamiento puede incrementarse al aumentar la resistencia del devanado del rotor, o bien, al reducir el voltaje en el devanado del rotor. De esta forma es que puede conseguirse el control de la velocidad en los motores de inducción de rotor devanado. Sin embargo, este tipo de variadores es de menor eficiencia que otros, razón por la cual en la actualidad tiene muy poca aplicación.

d) Variadores para motores de CA

Los variadores de frecuencia (siglas AFD ,del inglés Adjustable Frequency Drive; o bien VFD Variable Frequency Drive) permiten controlar la velocidad tanto de motores de inducción (asíncronos de jaula de ardilla o de rotor devanado), como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.

- a) Para el caso de un motor síncrono, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$N_s = 120 * f / P$$

- b) Cuando se trata de motores de inducción, se tiene:

$$N_m = 120 * f * (1 - s) / P$$

Donde:

N_s = velocidad síncrona (rpm)

N_m = velocidad mecánica (rpm)

f = frecuencia de alimentación (Hz)

s = deslizamiento (adimensional)

P = número de polos.

Como puede verse en las expresiones anteriores, la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Por ello es que este tipo de variadores manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina.

Estos variadores mantienen la razón Voltaje/ Frecuencia (V/Hz) constante entre los valores mínimo y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida.

3.4.2 Tipos de variadores AC de frecuencia ajustable

Para propósitos generales, los controladores de variadores AC de frecuencia ajustable son fabricados en tres tipos: Voltaje de Entrada Variable (VVI), Entrada de Fuente de Corriente (CSI) y Modulación por Ancho de Pulso (PWM). Cada uno tiene ventajas características específicas.

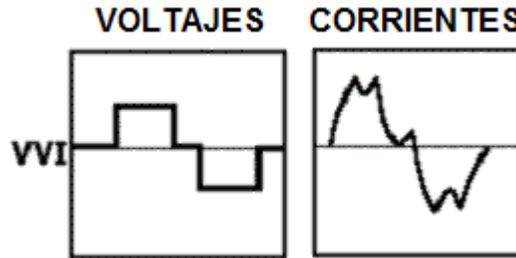
a) Voltaje de entrada variable (VVI).

Aunque este diseño fue común en la década de los 70s y comienzos de los 80s, es hoy en día limitado para aplicaciones especiales tal como variadores que desarrollan alta velocidad (400 a 3 000 Hz).

El diseño VVI, recibe voltaje AC de la planta, lo rectifica y controla, desarrollando un voltaje DC variable hacia el amplificador de potencia (etapa inversora). El amplificador de potencia invierte el voltaje DC variable a frecuencia variable y voltaje variable AC. Esto puede ser realizado por transistores de potencia o SCRs.

La salida de voltaje desde una unidad VVI es frecuentemente llamada “onda de seis pulsos”. El VVI fue uno de los primeros variadores AC de estado sólido que tuvo aceptación general.

Figura No. 34
Forma de onda de voltaje y corriente del VVI

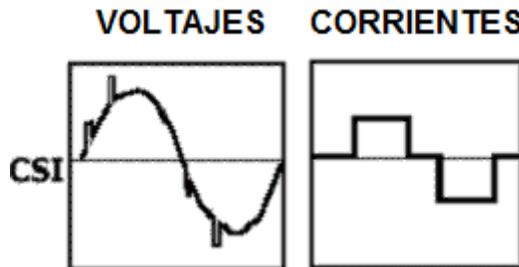


Fuente:<http://www.instrumentacionycontrol.net/es/curso-variadores-de-velocidad/199-tipos-de-variadores-de-velocidad-en-motores-ac.html>. Pág110

b) Inversor fuente de corriente (CSI).

Se usa en variadores con potencias mayores a 50HP. Las unidades CSI se encuentran bien situadas para el manejo de bombas y ventiladores como una alternativa de ahorro de energía para el control de flujo. Capaces de trabajar con eficiencias cercanas a los variadores DC, el diseño CSI ofrece economía sobre las unidades VVI y PWM para aplicaciones en bombas, ventiladores y similares. El CSI ofrece capacidad de regeneración. Con una sobre carga, el controlador alimenta energía de retorno al sistema AC.

Figura No.35
Forma de onda de voltaje y corriente del CSI



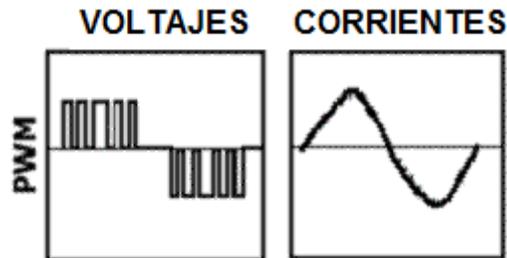
Fuente:<http://www.instrumentacionycontrol.net/es/curso-variadores-de-velocidad/199-tipos-de-variadores-de-velocidad-en-motores-ac.html>. Pág 111

c) Modulación por ancho de pulso (PWM).

Muchas unidades PWM (frecuentemente llamadas “variadores V/Hz”) ofrecen operación a cero velocidad. Algunos proporcionan rango de frecuencias cercanas a 200:1. Este amplio rango es posible pues el controlador convierte voltaje de entrada AC a un voltaje DC fijo por medio del rectificador de potencia.

Luego de este amplificador, el voltaje DC es modulado por medio de un inversor para producir pulsos de diversos anchos, para variar el voltaje efectivo. A pesar que el voltaje es modulado, la forma de onda de la corriente es cercana a una onda senoidal, mucho mejor que cualquier otro sistema. Las unidades PWM usan transistores de potencia IGBT’s.

Figura No.36
Forma de onda de voltaje y corriente del PWM



Fuente:<http://www.instrumentacionycontrol.net/es/curso-variadores-de-velocidad/199-tipos-de-variadores-de-velocidad-en-motores-ac.html> . Pág 120

Observando las formas de onda de corriente de la figura No. 36, deducimos que el variador tipo PWM es el que proporciona mejor calidad de corriente al motor AC, logrando que trabaje con mejor eficiencia y produciendo un control de torque más fino. Son por lo tanto los más usados en la actualidad

La onda de voltaje producida por el variador tipo PWM se denomina “Seno PWM” y es producto del trabajo a gran velocidad (llegando hasta 20 kHz) de los transistores IGBT, los cuales son comandados por medio de un sofisticado circuito de control micro computarizado.

3.4.3 Controlador del VFD

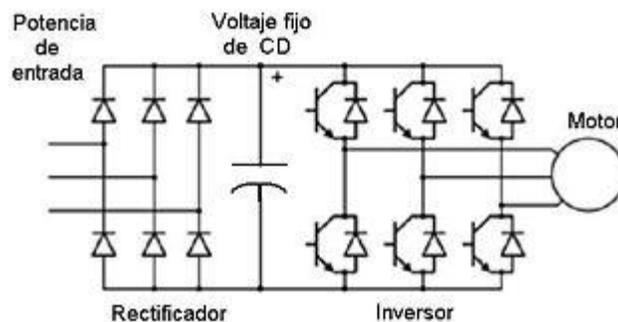
El motor usado en un sistema VFD es normalmente un motor de inducción trifásico. Algunos tipos de motores monofásicos pueden ser igualmente usados, pero los motores de tres fases son normalmente preferidos. Varios tipos de motores síncronos ofrecen ventajas en algunas situaciones, pero los motores de inducción son

más apropiados para la mayoría de propósitos y son generalmente la elección más económica. Motores diseñados para trabajar a velocidad fija son usados habitualmente, pero la mejora de los diseños de motores estándar aumenta la fiabilidad y consigue mejor rendimiento del VFD.

El controlador de dispositivo de variación de frecuencia está formado por dispositivos de conversión electrónicos de estado sólido. El diseño habitual primero convierte la energía de entrada AC en DC usando un puente rectificador. La energía intermedia DC es convertida en una señal quasi-senoidal de AC usando un circuito inversor conmutado. El rectificador es usualmente un puente trifásico de diodos, pero también se usan rectificadores controlados. Debido a que la energía es convertida en continua, muchas unidades aceptan entradas tanto monofásicas como trifásicas (actuando como un *convertidor de fase*, un variador de velocidad). En la figura No. 37 se ve un ejemplo de un posible circuito de de un variado de frecuencia con Modulación de Ancho de Pulso, PWM.

Figura No. 37

Diagrama variador de frecuencia con Modulación de Ancho de Pulso



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Diagrama_variador_de_frecuencia.JPG. Pág 29.

Tan pronto como aparecieron los interruptores semiconductores fueron introducidos en los VFD, ellos han sido aplicados para los inversores de todas las tensiones que hay disponible. Actualmente, los transistores bipolares de puerta aislada (IGBTs) son usados en la mayoría de circuitos inversores.

Las características del motor AC requieren la variación proporcional del voltaje cada vez que la frecuencia es variada. Por ejemplo, si un motor está diseñado para trabajar a 460 voltios a 60 Hz, el voltaje aplicado debe reducirse a 230 volts cuando la frecuencia es reducida a 30 Hz. Así la relación voltios/hertzios deben ser regulados en un valor constante ($460/60 = 7.67$ V/Hz en este caso). Para un funcionamiento óptimo, otros ajustes de voltaje son necesarios, pero nominalmente la constante es V/Hz es la regla general. El método más novedoso y extendido en nuevas aplicaciones es el control de voltaje por PWM.

3.5 Métodos para llevar a cabo la variación voltaje/frecuencia

De acuerdo al método para variar la velocidad sincrónica de un motor trifásico de corriente alterna, debemos alimentar el motor con una tensión y frecuencia variable, dependiendo de la velocidad que se quiera. Es muy importante tener en cuenta que al modificar la frecuencia que se aplica al estator, es necesario variar la tensión aplicada a de la misma forma y en la misma magnitud. Esto se debe hacer para mantener el mismo grado de saturación y densidad de flujo en el entrehierro del motor.

Existen dos maneras de realizar la variación en motores trifásicos, las cuales se explican a continuación:

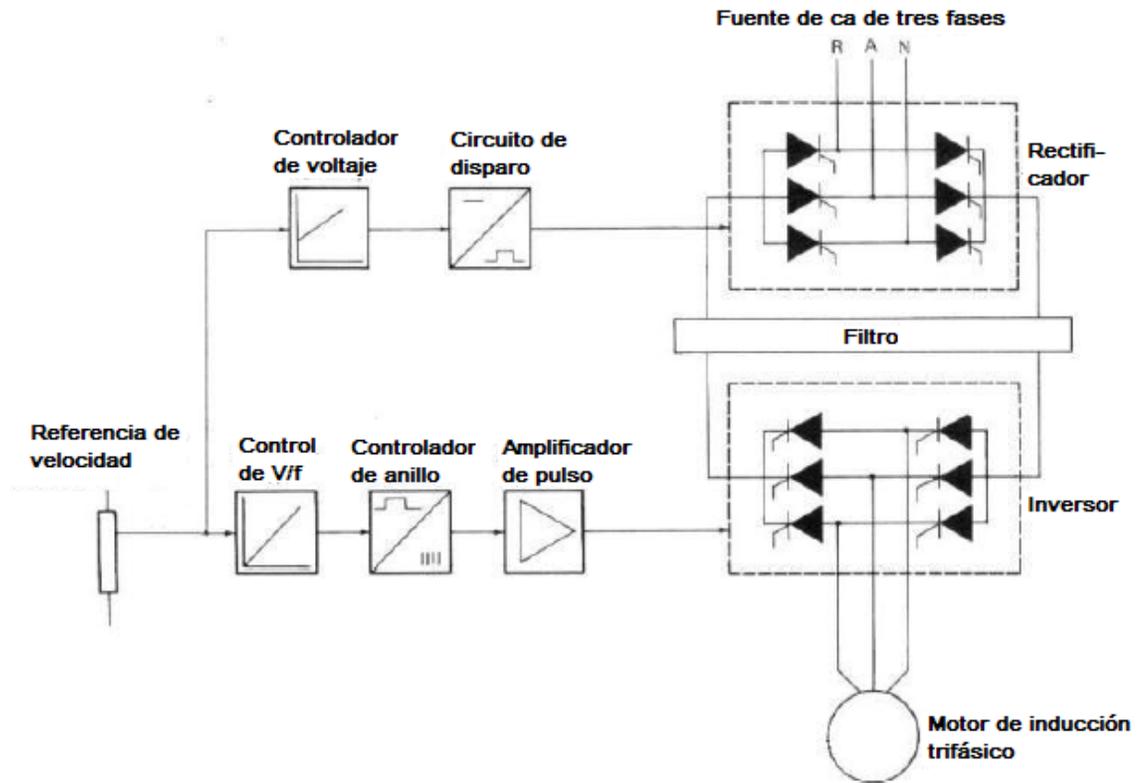
3.5.1 Por medio de tiristores

Por mucho tiempo los tiristores fueron parte fundamental del control de velocidad para motores de CA por variación de frecuencia. En un principio solo estos elementos podían ser utilizados para este fin, pues no existía en el mercado otro tipo de semiconductores que pudieran suministrar las corrientes que estos variadores demandaban. Además, este tipo de semiconductores, debiendo ser de potencia, tenían un alto costo. Esta característica hacía casi imposible su empleo en este tipo de equipos para motores de corriente continua.

Con el advenimiento de nuevas tecnologías para la fabricación de semiconductores, los tiristores fueron desplazados y en su lugar se fueron utilizando transistores de potencia, MOSFETS de potencia, y últimamente IGBT. Uno de los principales problemas que afrontaban con los tiristores era toda la circuitería paralela que se debía diseñar para su apagado. Además se tenía que emplear un gran número de tiristores dentro del diseño, ya que el control de velocidad para motores de CA prácticamente era dos controles en uno; un control de voltaje para la parte de voltaje CD y otro para la parte de frecuencia. Esto se puede ver en la figura No. 37

Figura No.38

Control de frecuencia de un motor de corriente alterna



Fuente: Sandoval Torres, Cinda Luz. **Variador de velocidad para motores trifásicos CA.** Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pág. 78

A continuación se explica los bloques que conforman la figura *referencia de velocidad*, básicamente constituido por una resistencia variable (potenciómetro), que servirá para ajustar el valor de referencia de 0 a 100%.

a) *Convertidor de V/F*

Esta etapa del control era prácticamente un convertidor de voltaje a frecuencia. El valor de voltaje que se obtenía de la

frecuencia de velocidad se convierte en un valor de frecuencia proporcional al voltaje de entrada y es la base de frecuencia de la velocidad del motor. Cabe mencionar que el control se efectuaba a lazo abierto.

b) Controlador de voltaje

El voltaje de referencia es aplicado también a este controlador de voltaje para generar un valor de voltaje proporcional a la frecuencia actual del contador de panillo. En esta etapa es controlado el torque del motor.

c) Circuito de disparo

El voltaje de control que se genera en la etapa controladora de voltaje es aplicado a esta etapa para disparar los tiristores.

d) Controlador de anillo

Esta es la parte digital del sistema, encargada de proporcionar la secuencia correcta y desplazar 120 grados cada uno de los pulsos de salida. La frecuencia dependía exclusivamente de la etapa anterior.

e) Amplificador de pulsos

Debido a que los elementos finales de control eran tiristores, la señal debía acondicionarse y aislarse galvánicamente del tiristor

para no afectar los elementos generalmente TTL del contador de anillo.

3.5.2 Control del voltaje y frecuencia mediante modulación de ancho de pulso (PWM)

Mediante esta técnica se puede controlar la magnitud y frecuencia de la señal de salida mediante la modulación del ancho del pulso de los interruptores del inversor. La modulación de ancho de pulso es el proceso de modificar el ancho de los pulsos de un tren de pulsos en razón directa a una pequeña señal de control, cuando mayor sea el voltaje de control, será más ancho el pulso resultante.

Existen diferentes tipos de modulación por ancho de pulso, tales como modulación por ancho de pulso único, por ancho de pulso múltiple, sinusoidal, sinusoidal modificado, entre otros, cada uno con sus respectivas características. Dado que en este trabajo se necesitar producir una señal senoidal se emplea la modulación por ancho de pulsos sinusoidal.

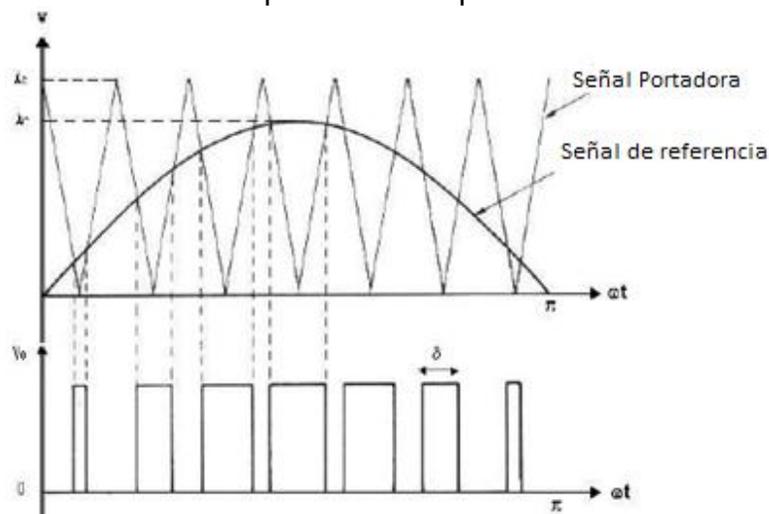
Las señales de control, se generan comparando a una señal de referencia sinusoidal de amplitud A_r , con una onda portadora triangular de amplitud A_c y frecuencia f_c . La frecuencia f_r de la señal de referencia determina la frecuencia fundamental de la salida del inversor. La variable del control es el índice de modulación de

amplitud (M), o índice de modulación, el cual es la relación de A_r entre A_c

$$M = A_r / A_c$$

Si se varía A_r desde 0 hasta A_c , se puede modificar el ancho de pulso δ , de 0° a 180° . De esta manera, la amplitud pico de la sinodal controla el índice de modulación M , y en consecuencia el voltaje RMS de salida V_o . La Figura No. 39 muestra lo explicado anteriormente.

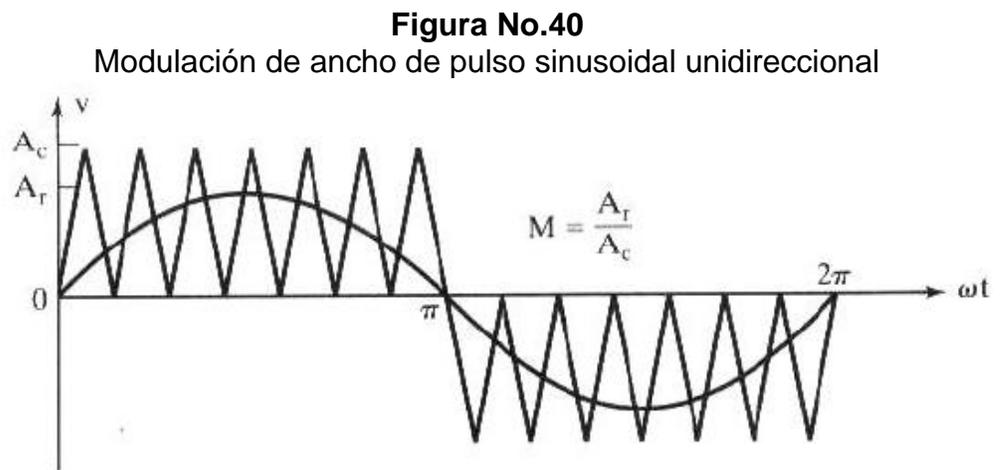
Figura No. 39
Modulación por ancho de pulso sinusoidal



Fuente: Sandoval Torres, Cinda Luz. *Variador de velocidad para motores trifásicos CA*. Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pág. 78

La cantidad por pulsos por medio ciclo depende de la frecuencia de la portadora. Se puede observar que el área de cada apulso corresponde en forma aproximada, al área de bajo la onda sinusoidal, ente los puntos medios adyacentes de los periodos de apagado de las señales de control.

Se puede generar las mismas señales de disparo con una onda portadora triangular unidireccional como se ve en la figura No. 40



Fuente: Sandoval Torres, Cinda Luz. *Variador de velocidad para motores trifásicos CA*. Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Al finalizar el resultado de la forma de onda de la modulación de ancho de pulso sinusoidal unidireccional, se noto que para las señales de control en un puente inversor trifásico, el semiciclo positivo puede ser idéntico al semiciclo negativo, desfasado este último 180° . En base a esta característica, las señales de control se pueden basar solo en los valores de la señal PWM resultante de semiciclo.

Finalmente, después de analizar las técnicas para llevar a cabo la variación de frecuencia-voltaje para el control de velocidad en

motores de corriente alterna, se eligió el control por modulación de ancho de pulso sinusoidal unidireccional. Lo anterior debido a que el trabajo de la generación de las señales PWM unidireccionales se puede realizar con un microcontrolador.

3.6 Inversores para control de velocidad de motores de inducción mediante relación v/f.

La frecuencia de salida de un inversor esta determinada por la velocidad de conmutación on-off de los dispositivos semiconductores que lo conforman, por lo que se tiene una salida de frecuencia ajustable intrínseca esta característica. Sin embargo, normalmente la salida del inversor resulta en una onda no senoidal de voltaje y corriente que puede afectar severamente el funcionamiento del motor. El filtrado de los armónicos no es factible cuando la frecuencia de salida varia en un rango amplio y la generación de ondas de ac con bajo contenido armónico es importante.

El inversor debe recibir la entrada de dc desde una batería pero en la mayoría de las aplicaciones industriales se encuentra alimentando por un rectificador, ya sea de diodos o de tiristores.

Los inversores pueden clasificarse según estén alimentados por una fuente de voltaje (VSI) o de corriente (CSI). Los primeros están alimentados por una fuente de dc de baja impedancia como puede ser una batería o un rectificador, en el que a la salida tendrá un filtro LC. El filtro capacitivo en paralelo con las terminales del inversor mantiene un voltaje de dc constante. Por lo tanto, este inversor es una fuente de voltaje frecuencia

ajustable en donde la salida de voltaje es esencialmente independiente de la corriente de carga.

Por otro lado, el inversor de corriente controlada desde una fuente de dc de alta intensidad. Típicamente un rectificador de tiristores controlados por fase alimenta esta inversor con una corriente regulada a través de un inductor en serie: por lo tanto, la corriente de carga es controlada y el voltaje de salida del inversor es dependiente de la impedancia de la carga.

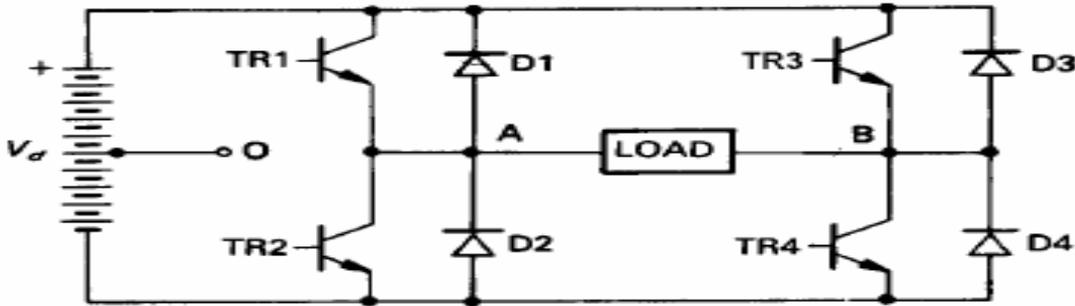
A continuación se incluirán los puentes inversores monofásico y trifásico modulados por PWM, siendo estos del tipo fuente de voltaje, ya que son los que nos serán de utilidad para obtener la relación voltaje/frecuencia variable para controlar la velocidad de un motor de inducción.

3.6.1 Puente inversor monofásico modulado por PWM.

Un puente inversor monofásico que se muestra en la figura No. 41 entrega como salida de voltaje una onda cuadrada de amplitud V_d mediante la conmutación de los transistores en pares diagonales; sin embargo, si se introduce un desplazamiento de fase de 120° entre la conmutación de cada rama como se muestra en la Figura No. 42, el voltaje de salida V_{AB} (igual a $V_{A0}-V_{B0}$) es una onda casi cuadrada con intervalos de cero voltaje de 120° de duración en cada medio.

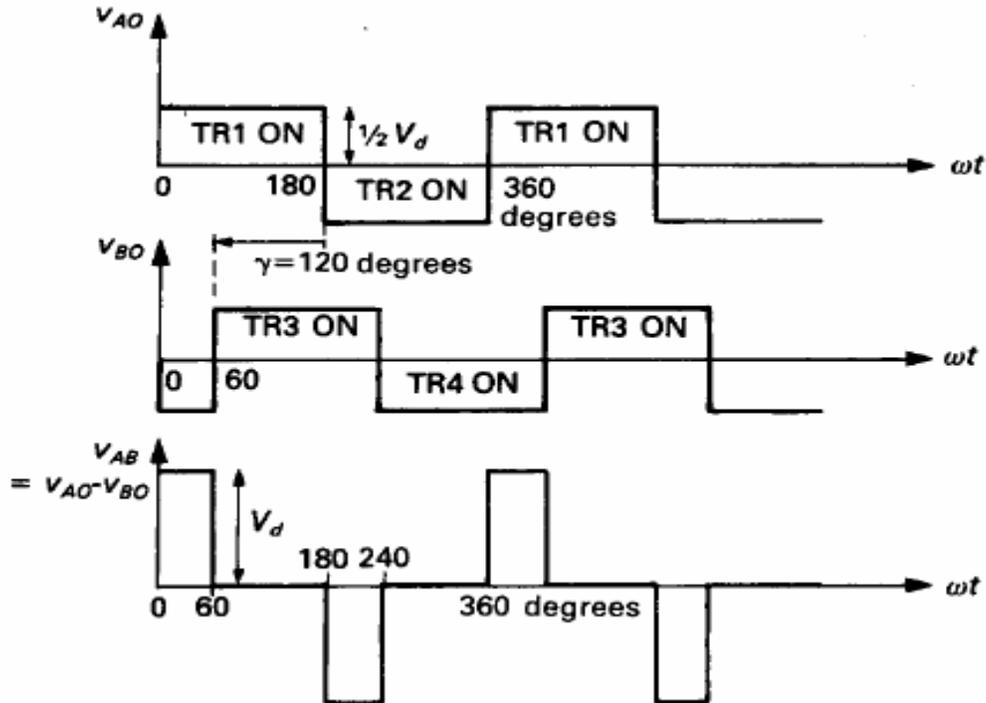
Estos intervalos corresponden a las veces en que las terminales A Y B están conectadas simultáneamente al suministro de dc y la corriente de carga circula a través del transistor y el diodo de marcha libre.

Figura No. 41
Puente inversor monofásico.



Fuente: Salvatori Artezan, Marco. **Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación Voltaje/frecuencia.** Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pág. 90.

Figura No. 42
Ondas de salida para el puente inversor monofásico.



Fuente: Salvatori Artezan, Marco. **Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación Voltaje/frecuencia.** Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pág. 89.

La importancia de esta técnica es que el voltaje fundamental de salida puede variarse desde el valor máximo hasta cero mediante el avance de los ángulos de conducción de TR3 y TR4 desde cero hasta 180° . Este método general de control de voltaje es llamado Modulación por anchura de pulsos (PWM) y esta técnica en particular se denomina modulación de anchura de un pulso por semiperiodo.

En general, el proceso de PWM modifica el contenido armónico del voltaje de salida y puede usarse para minimizar afectos armónicos indeseables en la carga.

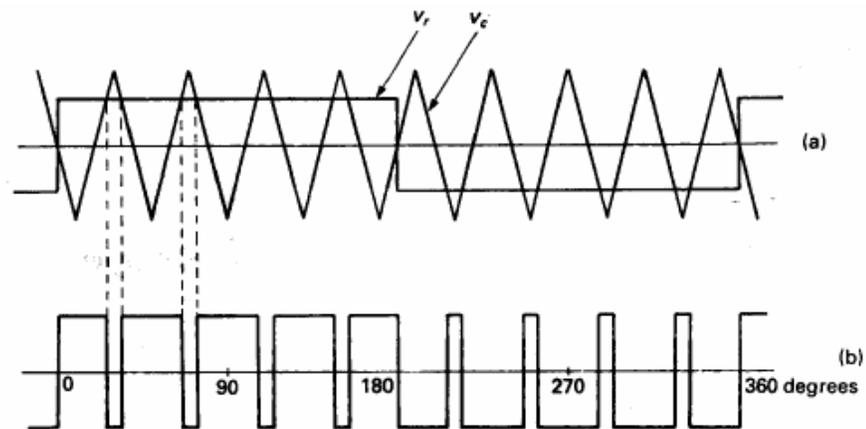
3.6.2 PWM cuadrado y puente inversor trifásico.

Una forma alternativa de PWM, conocida como modulación en anchura de varios pulsos por semiperiodo o PWM de onda cuadrada, implica obtener una serie de pulsos de igual anchura en cada medio ciclo, como se puede ver en la figura No.42. Esto se lleva a cabo conmutando la mitad del puente a la frecuencia fundamental requerida y la otra mitad a un múltiplo de la misma. La relación $T1/(T1+T2)$, es denominada el ciclo de trabajo de la onda PWM, y la magnitud del voltaje fundamental de salida se controla al variarse este. A voltajes reducidos de salida se obtiene un contenido armónico de orden menor mediante esta técnica.

Para el efecto, se requieren circuitos de control en el que una onda portadora triangular es comparada con una onda cuadrada de referencia con la frecuencia de salida deseada. Estas ondas se muestran en la figura No. 43 para una rama del inversor y los instantes de conmutación de los transistores se determinan por las intersecciones de las dos ondas.

Figura No. 43

Ondas de salida PWM cuadrada del inversor.



Fuente: Salvatori Artezan, Marco. Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación Voltaje/frecuencia. Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pág. 98.

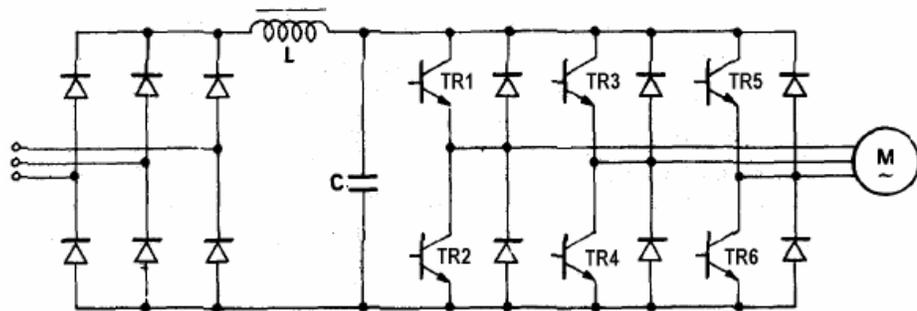
(a) voltajes de entrada del comparador; (b) salida del comparador y voltaje en las terminales.

Cuando el voltaje de referencia V_r (onda cuadrada), excede al voltaje de la portadora v_c , la salida del comparador es “alto” y el transistor de arriba se prende. Cuando v_r es menor que v_c la salida del comparador es “bajo” y el transistor de abajo se prende. La salida

del comparador de voltaje es una señal PWM como se muestra en la figura No. 42b y será también el voltaje polar del inversor. El número de pulsos por cada ciclo (p) está determinado por la relación entre la portadora y la frecuencia de referencia. Para la figura No.42b, p tiene un valor de nueve.

En un inversor trifásico mostrado en la figura No. 44 cada medio ciclo tiene un comparador separado, el cual es alimentado por la misma portadora triangular. Sin embargo, las tres ondas cuadradas de referencia tienen un desplazamiento de 120° , formando un sistema balanceado de tres fases. Si la relación con la portadora es un múltiplo de tres, la onda triangular tiene una relación de fase idéntica con cada una de las tres señales cuadradas moduladas, lo que se refleja en cada voltaje polar. La figura No.45 muestra las ondas cuadradas de referencia para la fase A, B, y C, la portadora triangular común a ellas, para una relación de seis. Los voltajes de polo V_{A0} , V_{B0} y V_{C0} también se muestran.

Figura No. 44
Puente inversor trifásico



Fuente: Salvatori Artezan, Marco. **Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación Voltaje/frecuencia**. Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pág.90.

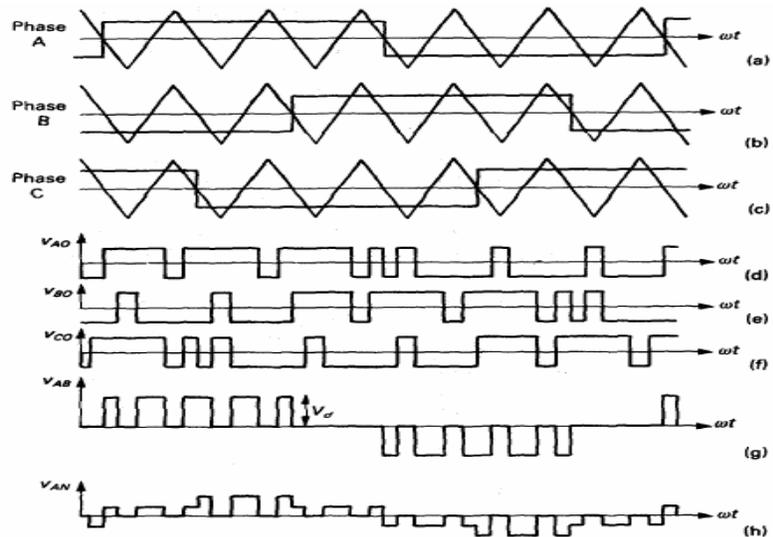
3.6.3 Puente inversor trifásico.

Como es usual, el voltaje de línea $V_{AB} = V_{AB} - V_{B0}$ dando una serie de pulsos de igual anchura uniformemente separados, de amplitud V_d en cada medio ciclo, con un pulso de media anchura a los extremos.

El índice de modulación M está definido como la relación existente entre la amplitud de la onda de referencia (V_r) y la amplitud de la portadora (V_c). En el la figura No. 44, M es igual a 0.6. Al observar estas ondas, se puede ver que el valor de M determina el ancho de cada pulso en el voltaje de polo, por lo que controla el voltaje de inversor. Generalmente, la amplitud de la portadora es fija; y es la onda de referencia la que controla el índice de modulación y el voltaje de salida. Cuando M es cero, los voltajes de polo de la figura No.45 son ondas cuadradas simétricas sin modular, y el voltaje instantáneo V_{AB} , es siempre cero.

Figura No. 45

Voltaje de salida para un inversor trifásico controlado por PWM cuadrado



Fuente: Salvatori Artezan, Marco. Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación Voltaje/frecuencia. Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica Pág. 97.

(a), (b), (c) voltaje de entrada del comprador; (d), (e), (f), voltajes de polo; (g) voltaje de línea; (h) voltaje en linea-neutro.

Para valores pequeños de M los pulsos del voltaje de salida son muy delgados, pero al incrementarse M , el ancho de pulso se incrementa proporcionalmente, incrementándose el área volts-segundos por medio ciclo y la amplitud del voltaje fundamental. Al aproximarse M a la unidad, la salida es como sería sin técnica PWM.

3.6.3.1 Relación v/f constante.

El ajuste de la frecuencia del inversor se hace simultáneamente variando la frecuencia de las portadoras y las ondas de frecuencia con su relación de fase. Estas condiciones se satisfacen cuando las dos son generadas por el mismo oscilador común. Al examinar la figura No.45 se puede ver que la duración de cada pulso en el voltaje de salida es proporcional al índice de modulación, M , y al periodo de la onda de referencia, T . Entonces, la duración del pulso, T_p , es proporcional a MT , o M/f en donde f es la frecuencia de la onda de referencia. Si la amplitud de la onda de referencia es variada linealmente con la frecuencia, entonces la relación M/f es constante, y la duración del pulso, T_p , es independiente de la frecuencia. En consecuencia, el área volts-segundos por medio ciclo es la misma a todas las frecuencias, lo que implica una operación con relación volts/herís constante. O desde otro punto de vista, ya que la amplitud del voltaje fundamental es función lineal de M , una relación constante de M/f implica v/f constante.

3.6.4 PWM senoidal

En la técnica de PWM cuadrado explicada anteriormente, la onda de frecuencia es una cuadrada trifásica. La frecuencia, amplitud y contenido armónico de esta señal de referencia son reproducidas a la

salida del inversor; en consecuencia, los armónicos de orden menor de la onda de referencia aparecen en la onda de salida. Sin embargo, la mayoría de los motores de ac están diseñados para operar con una fuente senoidal, por lo que la salida del inversor debe ser lo más senoidal posible. Para el efecto, la onda de referencia cuadrada debe ser reemplazada por una senoidal, para lograr una salida PWM en la que el ancho de pulso sea modulado senoidalmente en cada medio ciclo. Esta técnica se denomina PWM senoidal, o PWM subarmónico.

Cada fase del inversor está alimentada por un comparador para las dos ondas, la senoidal de referencia, y la portadora triangular, que es común a todas las fases.

De nuevo, p debe ser múltiplo de tres para asegurar el desfaseamiento de 120° en los voltajes de salida. La portadora triangular tiene una amplitud fija, y la relación de amplitudes entre la onda senoidal y la triangular de referencia se denomina índice de modulación, M .

El control del voltaje de salida se realiza variando la amplitud de la onda senoidal. Esta variación altera los anchos de pulso en el voltaje de salida, pero preserva el patrón de modulación senoidal.

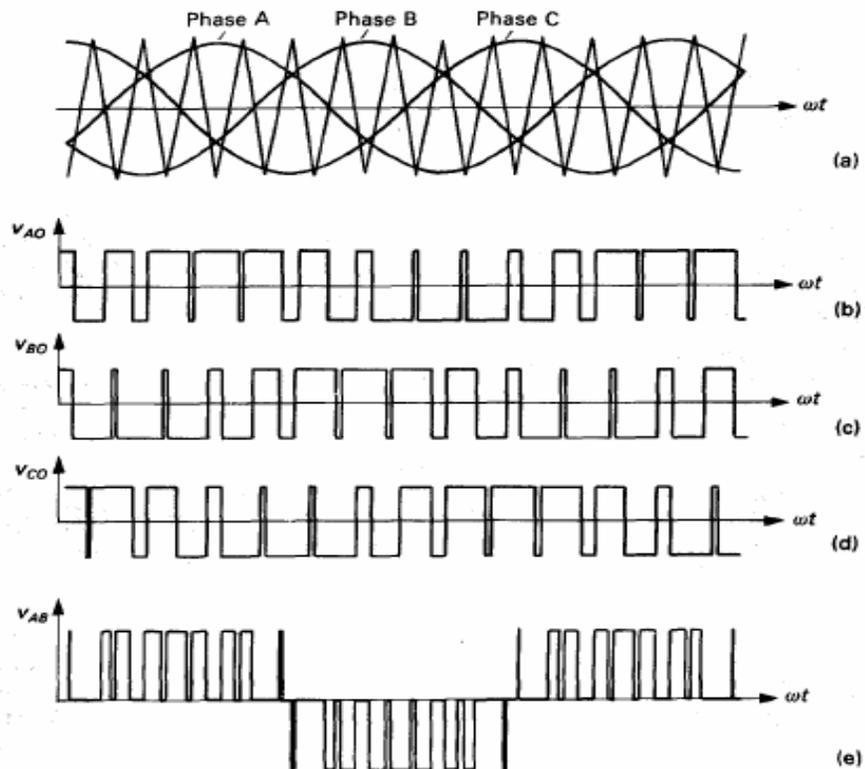
En la figura No.46, p es igual a nueve; y el índice de modulación es casi la unidad. Los correspondientes voltajes polares VA_0 , VB_0 ,

V_{C0} , y el resultante línea-línea, V_{AB} , se muestran en la figura No.46 b, c, d, y e.

La operación mediante frecuencia ajustable de una onda modulada senoidalmente a la salida del inversor para el control de velocidad de un motor de ac, requiere la generación de las tres ondas senoidales trifásicas con amplitud y frecuencia variables. Si el motor opera a velocidades muy bajas, el oscilador de referencia debe tener capacidad de baja frecuencia hasta cero herts. Con circuitos analógicos tradicionales, es muy difícil generar una onda de referencia senoidal sin encontrar problemas de offset de corriente directa y desviación de parámetros. En consecuencia, muchos de los inversores PWM adoptan el PWM cuadrado; sin embargo, la implementación de PWM senoidal ha sido facilitada por modernas técnicas digitales utilizando memoria programada o circuitos integrados a gran escala.

Para relaciones de portadora grandes, el inversor entrega una onda de salida de alta calidad en la que los armónicos dominantes son de orden mayor. Por lo tanto, se obtiene una rotación suave y uniforme incluso a velocidades muy bajas, ya que los armónicos indeseables de orden menor y las perturbaciones de torque, características de una onda cuadrada, son eliminadas.

Figura No. 46
 Ondas de voltaje para un inversor trifásico controlado por PWM
 senoidal



Fuente: Salvatori Artezán, Marco. **Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación Voltaje/frecuencia**. Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pág.123.

(a) voltajes del comparador; (b), (c), (d) voltajes polares; (e) voltaje en línea.

3.6.5. Control digital de un inversor PWM.

En los últimos años, se ha hecho énfasis en el uso de técnicas digitales para la generación de ondas PWM. La técnica de PWM senoidal emplea una onda senoidal modulante, la cual es comparada

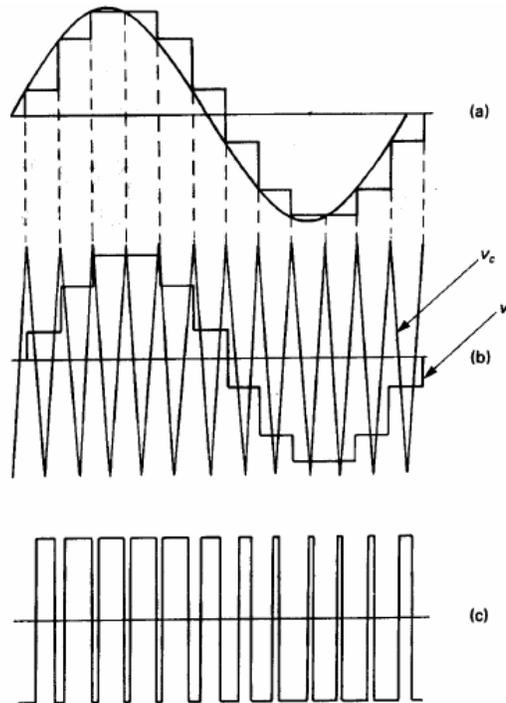
con una portadora triangular para determinar los instantes de comunicación del inversor. Esta técnica es conocida como *PWM por muestreo natural*, y ha sido adoptada ampliamente por su fácil implementación analógica. Mediante técnicas digitales, la onda senoidal de referencia puede ser almacenada como una tabla en memoria ROM, y los valores de la onda senoidal son accedidos a una velocidad correspondiente a la frecuencia fundamental requerida. Una onda portadora triangular es generada usando un contador, y las dos ondas se comparan digitalmente. Sin embargo, el muestreo natural es esencialmente una técnica analógica; y esta forma de implementación digital no es muy efectiva, en un inversor PWM controlado por un microprocesador, es difícil calcular los anchos de pulso de la señal por muestreo natural porque no están definidos por alguna expresión analítica.

3.6.5.1 PWM por muestreo regular.

Una forma alternativa similar, de naturaleza digital, se muestra en la figura No.47. La onda modulante senoidal es ahora muestreada en intervalos regulares correspondiendo a los picos positivos de la portadora. El circuito simple-and-hold mantiene un nivel constante hasta que se realiza la siguiente muestra. Este proceso resulta en una versión escalonada, o modulada en amplitud, de la onda de referencia. Esta onda escalonada, es comparada con la portadora triangular, y los puntos de intersección determinan los instantes de conmutación del inversor.

Figura No. 47

Ondas de voltaje para un inversor trifásico controlado por PWM senoidal.



Fuente: Salvatori Artezan, Marco. Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación Voltaje/frecuencia. Tesis. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pág130.

(a) voltajes del comparador; (b), (c), (d) voltajes polares; (e) voltaje en línea.

La versión simple-and-hold de la onda modulante tiene una magnitud constante para cada pulso. Por lo tanto, el ancho de pulso es proporcional a la altura del escalón, y el centro de cada pulso ocurre a intervalos uniformemente espaciados. De ahí que se le llame muestreo regular o uniforme.

En un sistema implementado mediante una memoria ROM, hay una reducción sustancial de memoria requerida, comparado

con la técnica de muestreo natural. La figura 47 muestra que el número de valores senoidales requeridos para definir un ciclo completo de la versión simple-hold de la onda modulante, es igual a la relación de portadora utilizada; mientras que en un muestreo natural, se requiere de una onda senoidal y de la definición de un ciclo completo en intervalos de 0.5 grados, lo que requiere 720 valores.

4. PARAMETROS DE UN SISTEMA DE CONTROL

4.1. Sistemas de control

La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados.

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 maquina manipulando el caudal de vapor por medio de una válvula.

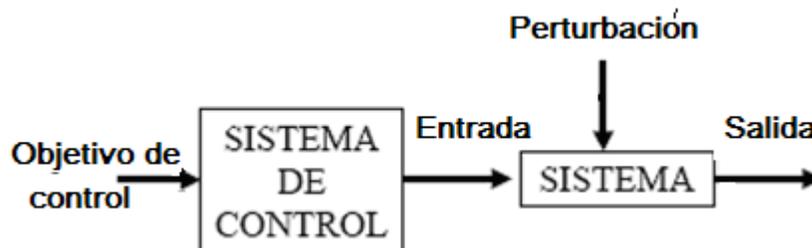
El primer análisis de un sistema de control es la explicación matemática del regulador centrífugo por James Clerk Maxwell en 1868. Mas tarde la técnica del regulador se adjudico a otras máquinas y turbinas y a principio del siglo XX comenzó la aplicación de reguladores y servomecanismos en reguladores 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.

Benjamín C Kuo define un sistema de control como el arreglo de componentes físicos relacionados de tal manera que comandan, regulan o dirigen, a si mismos o a otros sistemas. También el 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 maquinas-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 No. 48
Sistema de control



Fuente: Elaboración propia, año 2010.

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 próspera 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:

- a) Garantizar la estabilidad, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
- b) 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.
- c) 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:

- a) Sistemas de control manuales: operados por el hombre
- b) 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 vehículo, 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 vehículo. El velocímetro indica la velocidad actual del vehículo. La velocidad límite del vehículo indica la velocidad deseada. 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 vehículo, para determinar qué 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 vehículo. La decisión de aumentar, disminuir, o mantener la velocidad del vehículo, 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:

- a) Variable de entrada: es una variable del sistema tal que una modificación de su magnitud o condición puede alterar el estado del sistema.
- b) Variable controlada: es una variable del sistema que se mide o controla.
- c) Variable manipulable: es la variable que ha sido manipulable para llevar el sistema al setpoint dada por el sistema de control.
- d) 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

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

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 dos rasgos sobresalientes:

- a) La habilidad que estos tienen para ejecutar una acción con exactitud esta 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.
- b) 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 seria 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 solo 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:

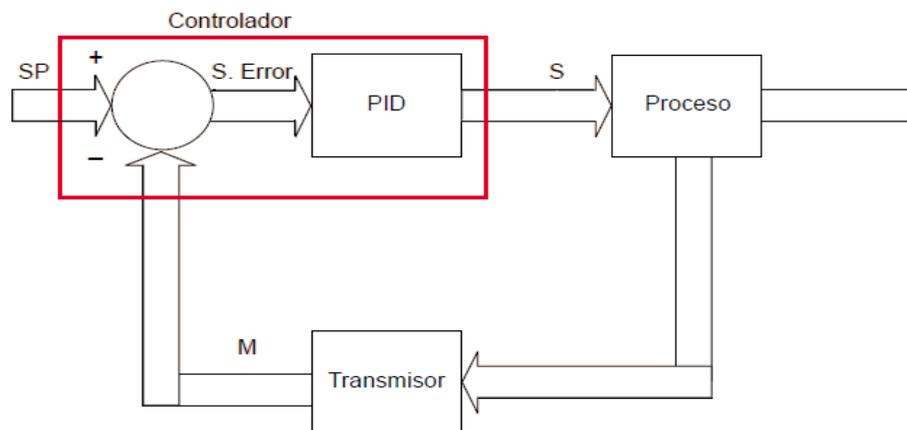
- a) No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia).
- b) Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada.
- c) La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.

- d) 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 No. 49
Lazo cerrado de control



Fuente: Elaboración Propia. Año 2010

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 entre 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:

- a) Aumento de la exactitud. Por ejemplo, la habilidad para reproducir la entrada fielmente.
- b) Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones en las características del sistema.
- c) Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- d) Aumento del intervalo de frecuencias (de la entrada) en el cual el sistema responde satisfactoriamente (aumento del ancho de banda).
- e) 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 esta determinada por los controladores. Específicamente la posición del elemento final de control esta 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 esta determinado por las necesidades del sistema de control.

A menudo los dispositivos finales de control 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 solo tienen ventajas

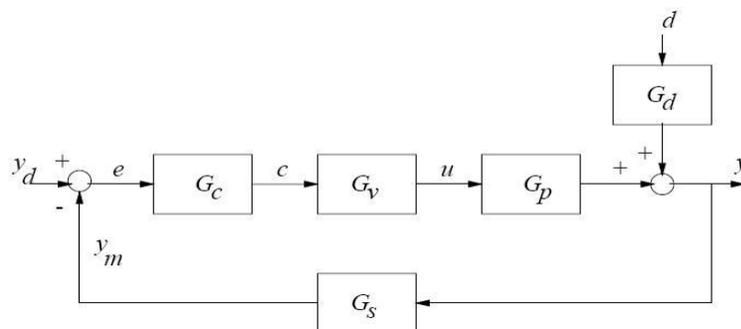
cuando se presentan perturbaciones impredecibles y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema.

4.5. Descripción del lazo de control

4.5.1. Control Feedback

La realimentación, también llamado retroalimentación o por su traducción en ingles feedback. En un sistema de control, este 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 sistema de control feedback se puede representa en términos de diagramas de bloques:

Figura No. 50
Lazo de control

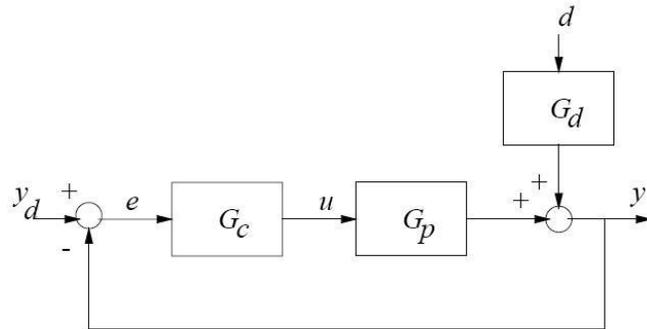


Fuente: Antonio Flores T. **Sistemas de Control Feedback**. Departamento de Ciencias Universidad Iberoamericana Prolongación Paseo de la Reforma 880 México DF, 01210, MEXICO . Pág. 76.

Donde G_v es la función de transferencia del elemento final de control (normalmente es una válvula de control), y G_s es la función

de transferencia del sensor. Normalmente se acostumbra suponer que las constantes de tiempo de la válvula de control y del sensor son muy pequeñas (en comparación con las constantes de tiempo del controlador, planta y perturbaciones) de forma que su respuesta es inmediata. Esto significa que: $G_v = 1$ y $G_s = 1$, y el diagrama de bloques se reduce a:

Figura No. 51
Sistema de control a lazo cerrado

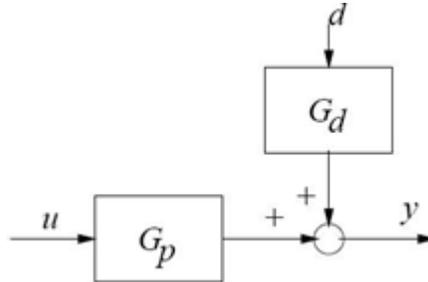


Fuente: Antonio Flores T. **Sistemas de Control Feedback**. Departamento de Ciencias Universidad Iberoamericana Prolongación Paseo de la Reforma 880 México DF, 01210, MEXICO. Pág.78.

De este diagrama de bloques debe notarse que:

- a) El sumador obtiene la señal de error: $e = y_d - y$ que representa la desviación que ocurre entre el valor deseado de la variable de salida (y_d) y el valor medido de dicha variable (y).
- b) El sumador representa el efecto combinado (aditivo en este caso ya que estamos trabajando con sistemas lineales) de la respuesta de la planta a una acción de control (dada por el producto $G_p u$) y del efecto de una perturbación sobre la respuesta del sistema.

Figura No. 52
Sistema de control de lazo cerrado reducido



Fuente: Antonio Flores T. **Sistemas de Control Feedback**. Departamento de Ciencias Universidad Iberoamericana Prolongación Paseo de la Reforma 880 México DF, 01210, MEXICO. Pág.80.

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:

- a) 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.
- b) Controlador con acción directa: Controlador que ante un incremento positivo (+) de la variable controlada, responde con un incremento positivo (+) de la variable manipulada.

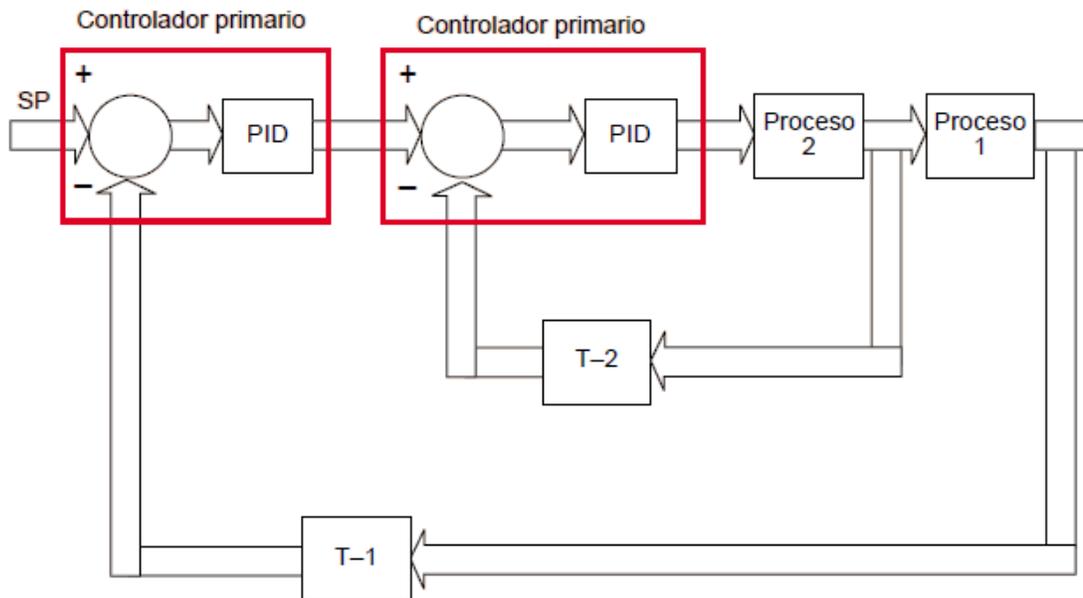
4.5.2. Control en cascada

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 esta 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).

El sintonizado de un control en cascada se realiza ajustando en primer lugar el lazo secundario en modo automático y, una vez obtenida una respuesta satisfactoria, se ajusta el lazo primario, con el secundario conectado en cascada. Suele ocurrir que el lazo secundario es más rápido que el primario y por tal motivo admitir altas ganancias de su controlador antes de volverse crítico, condición que generalmente desaconseja el empleo de la acción derivativa.

Figura No. 53
Diagrama de control en Cascada



Fuente: Mario Domínguez Valcárcel, **Control automático del proceso de producción**, sección de Electrónica Industrial, EUITI de Barcelona. Pág. 90

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 mas 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 limites de esta zona, el dispositivo controlado este 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)

El dispositivo controlado se posiciona proporcionalmente en respuesta a pequeños cambios de la variable controlada. No pasa de manera brusca de una posición máxima a otra mínima como en el caso del control de dos posiciones, ni continua en una u otra posición hasta que la variable controlada sea reconducida a la zona muerta como ocurren en el control flotante, en este caso la acción correctora asume un valor que se corresponde con la situación del

sistema en cada instante. La banda proporcional, habitualmente centrada en la consigna, es el rango que debe recorrer la variable controlada de un extremo al otro. 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 está 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:

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

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

K_p es el denominado factor de proporcionalidad

ϵ 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 termino del segundo miembro de la expresión, $K_p \cdot \varepsilon$, corresponde a al componente de acción proporcional y el segundo corresponde a la componente de acción integral. Obsérvese que el primer termino participa en la acción correctora total con un factor exclusivamente proporcional al error, mientras que el segundo termino 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)

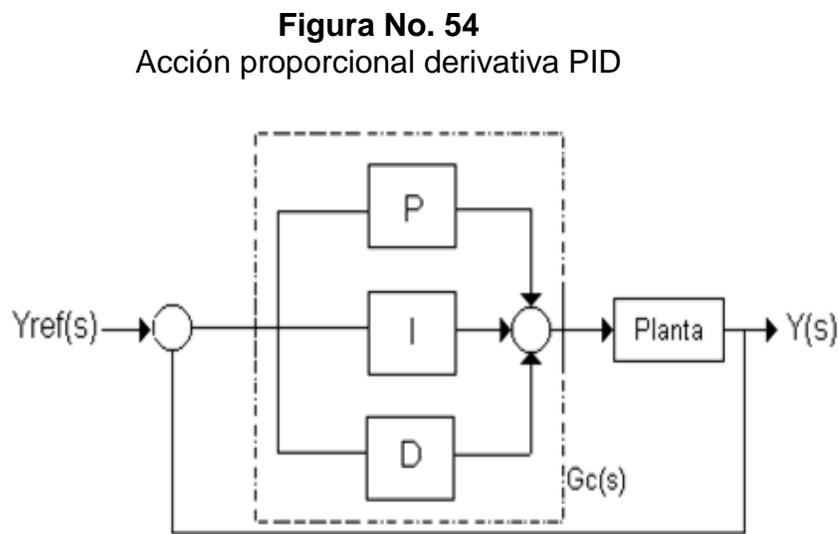
La acción de control derivativa genera una señal de control proporcional a la derivada de la señal de error, de este modo, el control derivativo mediante la derivada de la señal de error 'conoce' sus características dinámicas (crecimiento o decrecimiento), produciendo una corrección antes de que la señal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



Fuente: Elaboración Propia, Año 2010

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. Variables de control

La razón de ser de un sistema de control automático, es mantener una variable de proceso en un valor o un estado deseado, este valor deseado es conocido también como *setpoint*.

Hay algunas actividades que son estrictamente necesarias para poder implementar un control automático, la primera de ellas es establecer el valor deseado de las variables que afectan o influyen el estado final del sistema o proceso que queremos controlar, luego medimos el valor de estas variables u las comparamos respecto al valor deseado y es allí donde se fundamenta un concepto muy importante es sistemas de control: error.

Este valor de error, lo utilizamos con referencia para la toma de decisiones y acciones para proceder a reducir la diferencia entre el valor de la variable medido y el valor deseado.

En consecuencia la implementación de un sistema de control automático exige que exista un círculo o lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin la intervención de un operador humano.

Esto quiere decir que lo primero que debemos definir es cuales son las variables que realmente influyen en los cambios del estado deseado de nuestro sistema que deseamos controlar.

4.8.1. El lazo de control retroalimentado

En un lazo cerrado de un control con realimentación simple podemos observar cuatro elementos que son básicos en cualquier sistema de control: medición, control, suministro y variable controlada.

Las variables que normalmente se miden en un sistema de aire comprimido son: la presión y el caudal o flujo volumétrico del aire comprimido.

4.8.2. Medición

En esta etapa se toma la muestra del valor de la variable que estamos controlando, nos sirve para comparar este valor con el valor deseado de la variable, es necesario saber que variables vamos a medir, ya que cuando queremos controlar automáticamente un proceso, muchas veces caemos en el error de medir muchas variables que no influyen en el estado final del sistema, lo que hace que la implementación de los procesos se vuelva innecesariamente más cara.

4.8.3. Control

En la parte del control, tenemos elementos que son capaces de realizar las siguientes tareas: interpretar la medición, compararla con el valor deseado de las variables medidas y tener establecida las acciones a tomar dependiendo de la magnitud del error detectado, entendiéndose el error como la diferencia entre el valor medio y el valor deseado de la variable.

4.8.4. Suministro

El suministro se refiere a las acciones que son tomadas para disminuir la magnitud del error, en la parte del suministro se incluye los elementos que ejecutaran las ordenes emitidas por el controlador.

Para el caso de un sistema de producción de aire comprimido el suministro lo proveen los compresores de aire y son los que se encargaran de entregar la cantidad de aire comprimido que sea necesaria para satisfacer las cargas de aire comprimido instaladas den toda la planta.

4.8.5. Variable controlada

La variable controlada, es aquella que refleja la estabilidad del sistema que estamos controlando, esta variable será medida periódicamente para dar la realimentación al controlar para que este vuelva a compararse, u decidir las acciones a tomar para mantener el proceso controlado e iniciar así el lazo de realimentación.

4.8.6. Variable Manipulada

La variable manipulada, es aquella sobre la cual estaremos actuando, es decir es la variable que nosotros cambiamos de estado para tener como consecuencia un cambio en la variable controlada, en nuestro caso estaremos haciendo variar la frecuencia de los motores para suministrar la presión necesaria en el sistema.

4.9. La presión como variable de control del proceso de aire comprimido

Las dos variables que considerablemente influyen en la estabilidad de un sistema de producción, distribución y consumo de aire comprimido son la *presión* y *el caudal* o flujo volumétrico, esto debido a que todos los equipos neumáticos están diseñados para trabajar adecuadamente en rangos definidos para estas dos variables.

Para la medición de estas dos variables existen diferentes métodos y variados instrumentos, algunos más comunes que otros, la diferencia principal la definen los precios, debido a que en el mercado de instrumentos y dispositivos de medición se encuentran a precios mucho más bajos los medidores de presión que de caudal.

Haciendo una analogía con sistemas eléctricos, la presión se mide en paralelo al punto que deseamos medir al igual que el voltaje, y el caudal o flujo volumétrico se mide en serie al igual que la corriente eléctrica.

Al igual que el voltaje, en configuraciones en paralelo, la presión es constante en todas las ramificaciones, y el caudal o flujo volumétrico analógico a la corriente se distribuye por las ramificaciones proporcionalmente a la oposición que encuentra en cada rama.

4.9.1. Relación entre la presión y la demanda de aire

En la operación actual del sistema de producción de aire comprimido la medición que usan los operadores como referencia para entender y apagar compresores ya que cuando el suministro de volumen de aire comprimido no es suficiente, por la ley de BOYLE de gases ideales que expresa que la presión es inversamente proporcional al volumen del recipiente, podemos ver que cuando el volumen ocupado por el aire comprimido aumenta, la presión disminuye por lo que se puede concluir que las dos variables están directamente relacionadas por la ley de BOYLE y con esto podemos establecer con variables de control cualquiera de las dos variables, el caudal y la presión. Para el caso de este estudio en particular usaremos la presión como variable de control para el proceso de producción de aire comprimido.

La presión se relaciona con la demanda de aire de igual forma que con el caudal por medio de la ley de BOYLE de los gases ideales, por ejemplo, el principio de uso de aire comprimido para realizar un trabajo por la energía que libera en dicha expansión si imaginamos, una única tubería de aire comprimido a 100 PSI con una carga única cerrada por un extremo, cuando una porción de aire de la tubería alimenta la carga, la cantidad de aire contenido por la tubería disminuye por lo que el volumen que ocupa esa porción de aire comparado con el volumen que ocupaba antes de alimentar la carga es mayor, la presión dentro de la tubería también disminuye

Es por eso que la relación de la presión con la demanda de aire está dada de igual forma que con el caudal, cuando la demanda de aire se incrementa la presión del sistema disminuye.

Por lo tanto podemos utilizar la presión como variable de control ya que si mantenemos controlada la presión, el caudal o flujo volumétrico de aire disponible estará también controlado, la meta será mantener estable la presión ante incrementos en la demanda de aire comprimido en todo el sistema de distribución y consumo.

4.9.2 Punto de medición de la presión

La medición de la presión se puede realizar en cualquier punto del sistema, ya sea en la etapa de compresión, en la distribución o bien en los puntos de consumo, entre más diverso sea el campo la medición más precisa y exacta será la operación se un sistema, pero debemos tomar en cuenta que para efectos de un sistema de control automático, el hecho de poner un punto de medición en el punto más lejano de distribución nos daría un nivel de referencia muy completo, pero tendríamos que tomar en cuenta el precio de cableados e instalaciones adecuadas para traer esa señal desde el punto de medición deseado hasta el controlador , y esto implicaría costos muy elevados ya que el punto de consumo más lejano se encuentra a mas de 175 metros lineales de la etapa de compresión, por lo que tomaremos de referencia la medición de la presión en la salida del distribuidor de aire.

Esta estrategia de medición y realimentación al sistema de control de lazo cerrado, se conoce como estrategia feedback que consiste en tomar mediciones continuamente, convertir estas mediciones en señales y enviarlas al controlador del proceso para que se accione sobre la variable manipulada, lo que resulta en una variación del estado de la variable controlada.

4.9.3 Transductores piezoresistivos

Los transductores son elementos que se usan en la medición de variables basados en el concepto de transformar o convertir fuerzas de desplazamiento, transformar o interpretar cambios en las propiedades eléctricas de algunos elementos al ser sometidos al cambio en alguna variable con la temperatura, la humedad, la corriente eléctrica, etc.

Para la medición de la presión existen varios medio de medición, entre los cuales existen medio mecánicos como los elementos de resorte y diafragma conocidos como presostatos, existen también los transductores piezoelectricos que debido a los materiales cristalinos que los forman, tales como el cuarzo o el titanito de bario, producen una fuerza electromotriz cuando se colocan bajo condiciones de presión o tensión mecánica.

Los fabricantes de dispositivos de medición en la actualidad buscan ofrecer medidores que sean precisos, que tengan la capacidad de transformar el valor de la variable que están midiendo en señales analógicas que puedan servir de entrada a los controladores empleados en sistemas de control.

Para la medición de la presión existen dos familias de instrumentos de medición según su capacidad de operación: instrumentos de señal discreta que dan señales de encendido y apagado para indicar cuándo se ha llegado a un nivel determinado de presión, y los instrumentos de señal analógica que son los que se utilizan cuando es necesario conocer el valor exacto de la presión que se está midiendo en un sistema.

Los sensores piezoresistivos, se usan en tuberías o depósitos cerrados, tanques o distribuidores de aire, gas o vapores. Tienen la capacidad de entregar mediciones muy precisas, son de tamaño compacto.

Su funcionamiento se basa en el principio de exposición directa, el elemento de medición es fabricado con una base de silicón en combinación con elementos de alta pureza de alambres de platino, cobre o níquel, que al combinarse definen un valor de resistencia para el elemento final, al combinar la flexibilidad mecánica del silicón al ser sometido a la presión hace que la tensión mecánica sobre los elementos de platino, níquel y cobre varíen su resistencia y así

combinado con elementos eléctricos modula una señal de 4 a 20 miliamperios que es proporcional a la presión del aire a la que está sometido.

4.10 Estrategias de control de carga de compresores

Existen diferentes tipos de control para la regulación de la cantidad de aire que produce cada compresor, que incluyen el control de dos posiciones (on/off), el control carga / descarga, los controles modulantes, los controles por etapas, y los controles con motores con variadores de frecuencia.

Los controles de dos posiciones (on/off) son los más simples, y pueden ser aplicados a compresores reciprocantes o rotatorios. Este tipo de control pone en servicio o apaga el compresor en respuesta a una señal de presión. El mismo no se puede aplicar en el caso de frecuentes ciclos de variación de la demanda, ya que las arrancadas repetidas del pueden provocar su sobrecalentamiento del motor e incrementar significativamente los costos de mantenimiento del compresor.

Los controles de carga/descarga (load/unload) mantienen trabajando continuamente el compresor a velocidad constante, dejándolo sin carga cuando la presión de descarga alcanza el valor requerido. Los fabricantes emplean diferentes sistemas para descargar al compresor, pero el consumo de potencia en vacío puede ser importante. Por ejemplo, es usual que un compresor rotatorio de tornillo consuma entre el 10 y el 15 %

de su consumo a plena carga sin estar realizando ningún trabajo útil, lo cual puede conducir a sistemas ineficientes si los periodos de bajas cargas son prolongados.

Los controles por etapas (part-load) operan en condiciones de dos o más condiciones de carga parcial, permitiendo mantener la presión más cerca del valor prefijado sin necesidad de parar y arrancar el compresor tan frecuentemente como con un control de dos posiciones. Estos controles se utilizan con frecuencia en compresores reciprocantes y se diseñan para que el compresor trabaje en tres (0%, 50%, 100%) y hasta cinco (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) condiciones de carga diferentes.

Los controles modulantes posibilitan el trabajo del compresor a diferentes capacidades mediante un estrangulamiento del aire en la succión. Este esquema de control se emplea generalmente en compresores rotatorios y centrífugos, sobre todo en este último tipo empleando el sistema de alabes guías en la succión. El empleo de motores con variadores de frecuencia ha sido bastante poco usual en el accionamiento de compresores, debido a que el alto costo inicial de los mismos puede no justificar la ganancia en eficiencia sobre otros métodos de control. Actualmente, cuando los costos de los accionamientos con variadores de frecuencia han disminuido considerablemente, los mismos podrían ir ganando en aceptación en los sistemas de aire comprimido en la medida que siga aumentando su confiabilidad y eficiencia a plena carga.

5. AUTOMATIZACION DE UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

En la información anterior se estudiaron los componentes fundamentales de un sistema de aire comprimido, y la información necesaria para realizar una automatización al sistema. En el presente capítulo se proponen los cambios y pasos necesarios para realizar una automatización funcional para el ahorro de energía.

5.1 Sistema de Aire comprimido

5.1.1. Proceso de trabajo de un sistema de aire comprimido

Para producir aire comprimido se utilizan compresores que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. Los mecanismos y mandos neumáticos se alimentan desde una estación central. Entonces no es necesario calcular ni proyectar la transformación de la energía para cada uno de los consumidores. El aire comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías. El depósito en el que se almacena el aire comprimido puede ir acoplado al compresor o ser independiente según las necesidades. Su tamaño se calculará en

función de la demanda de aire. En este depósito (o en la instalación) se montan una serie de dispositivos para el buen funcionamiento del equipo:

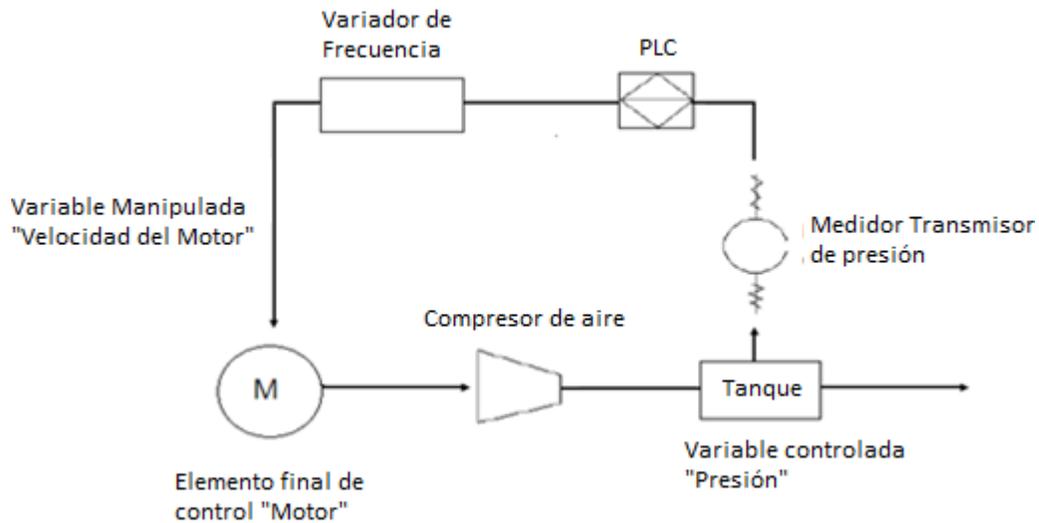
- a) *Manómetro*: mide la presión el depósito (calderin).
- b) *Válvula de seguridad*: expulsa el aire a la atmósfera en el caso de que la presión en el calderin sea peligrosa.
- c) *Presostato*: esta encargado de convertir presión neumática en señal eléctrica.
- d) Purgador decantador general automático de línea.

5.1.2 Propuesta para el control de un sistema de aire comprimido

Si tomamos en cuenta el funcionamiento de un sistema de de aire comprimido, podemos notar que tiene un funcionamiento tipo carga/descarga que mantiene trabajando continuamente él compresor a velocidad constante, dejándolo sin carga cuando la presión de descarga alcanza el valor requerido, es importante que tomemos en cuenta el consumo de potencia en vacío ya que sigue consumiendo energía innecesaria en este estado, 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 sistema de aire comprimido, la variable que se estará monitoreando en todo momento será la presión, 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 PI, 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.

Figura No. 55
Sistema de control propuesto.



Fuente: Elaboración propia, año 2010.

5.2. Variables influyentes en la automatización de un sistema de aire comprimido

Para la automatización de un sistema de aire comprimido, se toman en cuenta las variables que afectan directamente el proceso, las importantes para la automatización son: la variable controlable y la variable manipulable. Como variable manipulable controlable tomaremos la presión que debe contener el depósito de almacenamiento de aire, que es el encargado de suministrar la presión necesaria al sistema, por otro lado

tendremos como variable manipulable la velocidad a la que el motor del compresor deberá de estar trabajando para mantener la presión adecuada en el recipiente y por ende en el sistema en general.

5.2.1 Variable controlable:

Como mencionamos anteriormente la variable controlable en nuestro sistema es la presión.

La presión suministrada por el compresor debe mantenerse dentro de unos límites prefijados de antemano, cualquiera que sea el caudal demandado por la instalación. Para realizar esta función se dispone un regulador de presión cuya acción se ejecuta actuando sobre: el compresor, el circuito o sobre el motor de arrastre.

En algunos compresores de émbolo, el regulador mantiene abierta la válvula de admisión cuando se alcanza el valor de la presión regulada, así, se permite el escape de aire por ella y el compresor gira en vacío hasta que desciende la presión en el circuito. Llegado el momento en que la presión ha bajado, la válvula de admisión queda liberada permitiendo el normal funcionamiento.

En otros casos se dispone una válvula a la salida del compresor, que permite el vertido del aire a presión hacia la atmósfera cuando se supera el valor de presión establecido; este sistema no se utiliza actualmente porque es antieconómico.

Actualmente el sistema más empleado es el que actúa sobre el motor que acciona el compresor, haciendo que se pare cuando se alcanza la presión de regulación. El sistema consiste en disponer un presostato en el circuito de presión que corta la corriente del motor eléctrico cuando se alcanza la presión establecida; el circuito se restablece cuando la presión ha bajado por debajo de un límite inferior.

En los equipos de producción de aire comprimido, se dispone a la salida del compresor de un depósito acumulador en el que se almacena aire a presión en espera de su utilización. Este depósito cumple las siguientes funciones:

- a) Amortigua las pulsaciones del caudal de salida del compresor. (Ondas de presión).
- b) Es una reserva de aire a presión para cuando la demanda de aire sea superior a la capacidad de producción de aire comprimido del compresor. Los depósitos suelen ser cilíndricos y de chapa de acero. En ellos se encuentran:
 - a. Un termómetro
 - b. Un manómetro

- c. Una válvula de cierre
- d. Un purgador
- e. Una válvula limitadora de presión

Gracias al termómetro y al manómetro podemos saber en cualquier momento la presión y la temperatura en el interior del depósito. La válvula de cierre se encarga de aislar el depósito de la red de distribución. El tamaño del depósito estará en relación con el caudal y la presión del circuito al que esté conectado. El aire que entra al depósito se empieza a refrigerar por lo que desprende una buena parte de la humedad que contiene el aire en forma de agua. Esta agua será eliminada por el purgador.

La válvula limitadora de presión o válvula de seguridad permite el escape del aire almacenado en caso de superarse la presión máxima a que está tarada, evitando así posibles explosiones.

5.2.2 Variable manipulable:

Nuestra variable manipulable es la velocidad a la que el motor del compresor deberá de estar trabajando para mantener la presión adecuada en el sistema en general. Se utilizara un variador de frecuencia para controlar la velocidad a la que estará trabajando el

motor del compresor, una de las razones por la que utilizaremos un variador de frecuencia, es porque en la mayoría de sistemas de aire comprimido la capacidad para la que se seleccionan los compresores es para suministrar la capacidad máxima demandada por el sistema. Dado que las capacidades varía a lo largo del día y del año, los compresores diseñados para las capacidades máximas se consideran sobredimensionados durante períodos largos.

Se tiene el principio de control de velocidad de la frecuencia eléctrica. Este método es usado ampliamente en la industria, y por la naturaleza del método y sus efectos sobre el motor se observa que:

- a) No se necesita hacer cambios físicos en las conexiones del motor
- b) El motor controlado opera siempre en sus condiciones óptimas de funcionamiento
- c) Menor mantenimiento
- d) Permite un control gradual de la velocidad
- e) Es posible ajustar la velocidad del motor por encima o debajo de la velocidad base

Los fabricantes de equipos variadores de velocidad basan en este método el principio de operación de sus productos, desarrollando sus propios componentes, como micro controladores

especiales, logrando con ellos variar y controlar la velocidad de un motor con plena seguridad. Definitivamente el método de control por relación voltaje/frecuencia resulta ser mejor opción, ya que en general, al ser una aplicación dirigida a la industria, implica una mejora en la rentabilidad y la productividad de los procesos productivos.

5.3. Sensores a utilizar para la automatización

El sistema actual de aire comprimido cuenta con los siguientes sensores: un manómetro, el cual se encarga de indicarnos la presión real que se encuentra dentro del depósito de aire; una válvula de seguridad, la cual se encarga de expulsar el aire a la atmosfera en el caso de que la presión en el depósito se convierta peligrosa, al correr el riesgo de una explosión; Se cuenta con un presostato, también conocido como interruptor de presión. Es un aparato que cierra o abre un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión de un fluido, podemos agregar que es el encargado de convertir presión neumática en señal eléctrica; Un termómetro, encargado de medir la temperatura dentro del depósito.

Para realizar el nuevo control se propone tener otro sensor inmerso en el proceso, que puede ser un transductor de presión o un presostato, el cual le servirá al control para llevar la variable más rápido al setpoint. Se propone utilizar el Serie 33X de Keller que tiene una precisión de 0.01% FS con salidas análogas de 4 – 20 ma.

5.4. 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.

Qué 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.

5.4.1 El control proporcional:

Es uno de los más encontrados por su simplicidad el cual se describe con su ecuación básica $m = Kc \cdot e$, 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 Kc es la sensibilidad del controlador proporcional, que es en realidad el termino que se utiliza para el ajuste el cual puede

ser una 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:

$$PB = \frac{100\%}{Kc}$$

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 más sensitiva del controlador proporcional.

5.4.2 Control proporcional integral PI

Para la automatización del sistema de aire comprimido se utilizara el control proporcional integral, tomando en cuenta que 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 período 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 sería la siguiente:

$$V = K_c * e + \frac{k_c}{T_i} \int_0^T e * dt$$

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.

5.4.3 Control proporcional derivativa PD

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 más 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:

$$V = K_c * e + K_c * T_d * \frac{de}{dt}$$

5.4.4 Control proporcional integral derivativa PID

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

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.

Para el sistema de aire comprimido utilizaremos el control proporcional integral (PI), porque la respuesta del sistema es rápida, la presión se puede hacer variar rápidamente.

5.4.5 Sintonización del lazo de control

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

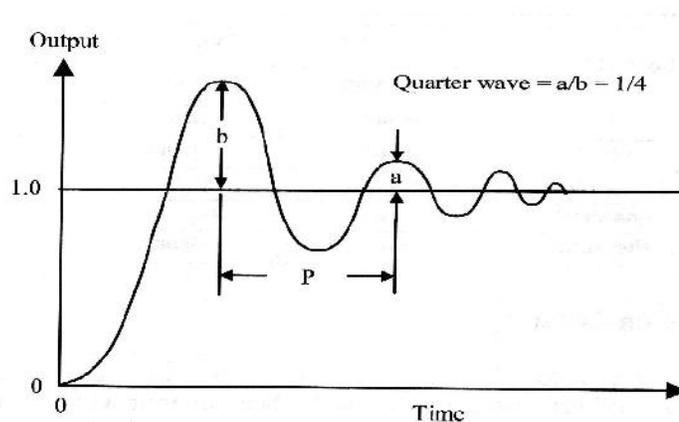
multiplicar el error absoluto por tiempo (ITAE), las ecuaciones que las describen son las siguientes:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2 dt \qquad IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \qquad ITAE = \int_0^{\infty} t|e| dt$$

Estos métodos son los más adecuados para un control por medio de computadora, ya que dan excelentes resultados para la sintonización del lazo de control, el cuarto método y el más 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 No. 56

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 *últimate gain* para el error del lazo de control, la *últimate 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 *últimate gain* o sensibilidad (S_u), el período en el que ocurren estas oscilaciones se llama *últimate período* (P_u), si la ganancia se aumenta en este último punto el sistema se vuelve inestable, para la determinación de estos se tienen los siguientes pasos:

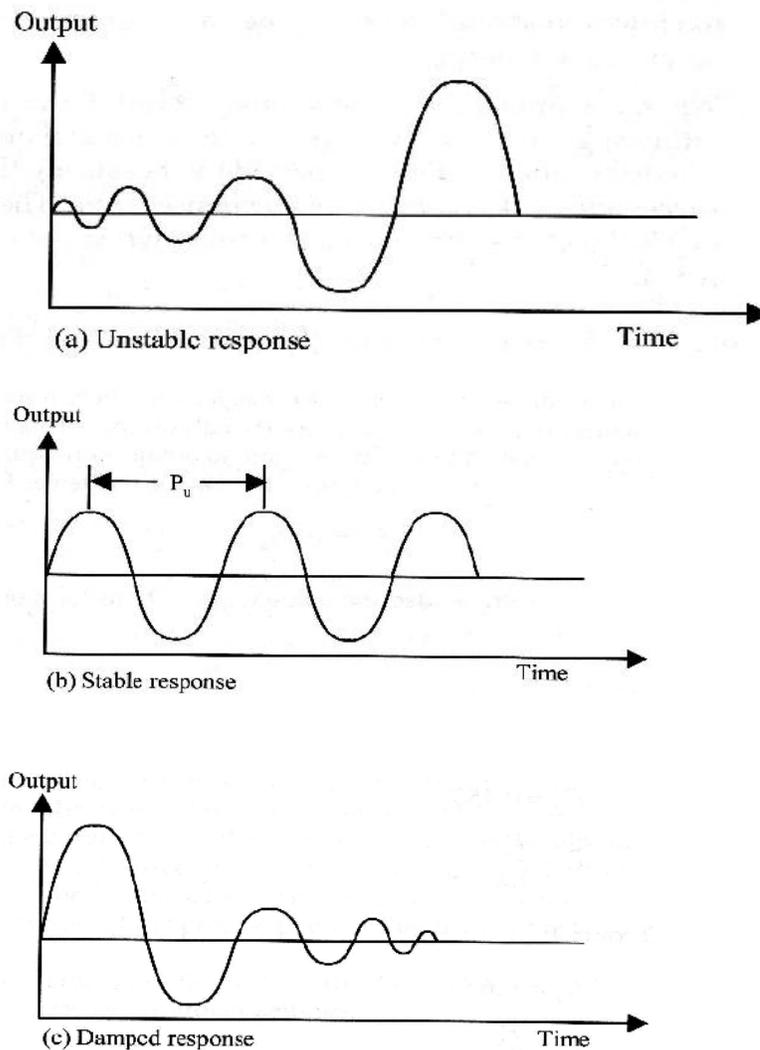
- a) Remover el reset y la acción derivativa para el controlador para enviar el tiempo a cero, el tiempo reset hacia infinito o el valor más alto posible, y la ganancia proporcional hacia 1.
- b) Colocar el controlador en automático y asegurarse que el lazo este cerrado.
- c) Crear un upset en el lazo 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.

- d) Si la curva de respuesta del paso 3 no amortigua y es inestable, (figura 57 a), la ganancia es muy alta, se puede disminuir la ganancia y repetir el paso 3, hasta obtener una respuesta estable (figura 57 b).

- e) Si la respuesta de la curva en el paso 3 no amortigua afuera (figura 57 c), la ganancia es muy baja, se puede incrementar la ganancia y volver a repetir el paso 3, hasta obtener una respuesta estable.

- f) 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 periodo 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 57
Curvas de respuesta del proceso típicas.



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

Al haber obtenido la última ganancia (S_u), y el último período (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: $Kc = 0.5Su$

Se recomienda utilizar las siguientes ecuaciones para controles más complejos:

$$\text{PI Control: } Kc = 0.45 Su \quad Ti = \frac{Pu}{1.2}$$

$$\text{PD Control: } Kc = 0.6 Su \quad Ti = \frac{Pu}{8}$$

$$\text{PID Control: } Kc = 0.6 Su \quad Ti = 0.5Pu \quad Td = \frac{Pu}{8}$$

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.

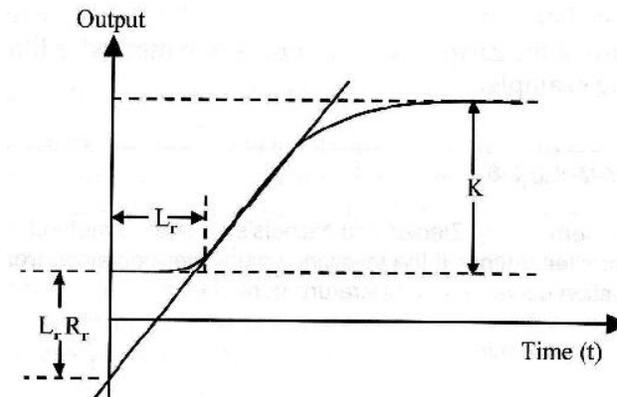
Para obtener un gráfico de proceso de una curva de reacción, colocar una alta velocidad, anotando en el lazo de control. Para obtener un registro de la curva de reacción, utilice los siguientes pasos:

- a) Permitir que el sistema de control bajo estudio llegue a un estado de equilibrio.
- b) Coloque el controlador de proceso para el sistema en modo manual.
- c) Ajustar manualmente el controlador de señal de salida para el valor en que se opera automáticamente
- d) Espere hasta que el sistema de control llegue a un estado de equilibrio
- e) 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.
- f) Registrar la respuesta de la variable medida.
- g) 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 58.

Figura 58.
Proceso de la curva de reacción



Fuente: Thomas 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 $L_r R_r$.

5.5. Automatización de un sistema de aire comprimido

5.5.1 Estructura básica de un PLC

De acuerdo con la definición de la "Nema" (National Electrical Manufacturers Association) un controlador programable es: "Un aparato electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales (ON/OFF) o analógicos (1 5 VDC, 4 20 mA, etc.), varios tipos de máquinas o procesos.

Un controlador lógico programable está constituido por un conjunto de tarjetas o circuitos impresos, sobre los cuales están ubicados componentes electrónicos. El controlador programable tiene la estructura típica de muchos sistemas programables, como por ejemplo una microcomputadora. La estructura básica del hardware de un controlador programable propiamente dicho está constituido por:

- Fuente de alimentación
- Unidad de procesamiento central (CPU)
- Módulos de interfaces de entradas/salidas (E/S)
- Modulo de memorias
- Unidad de programación

En algunos casos cuando el trabajo que debe realizar el controlador es exigente, se incluyen módulos inteligentes.

5.5.1.1 Fuente de alimentación

La función de la fuente de alimentación en un controlador, es suministrar la energía a la CPU y demás tarjetas según la configuración del PLC.

- + 5 V para alimentar a todas las tarjetas
- + 5.2 V para alimentar al programador
- + 24 V para los canales de lazo de corriente 20 mA.

5.5.1.2 Unidad de procesamiento central (C.P.U.)

Es la parte más compleja e imprescindible del controlador programable, que en otros términos podría considerarse el **cerebro** del controlador. Se selecciona el controlador Micrologix 1200 1762-L40AWA.

La unidad central está diseñada a base de microprocesadores y memorias; contiene una unidad de control, la memoria interna del programador RAM, temporizadores, contadores, memorias internas tipo relé, imágenes del proceso entradas/salidas, etc. Su misión es leer los estados de las señales de las entradas, ejecutar el programa de control y gobernar las salidas, el procesamiento es permanente y a gran velocidad.

5.5.1.3 Módulos de interfaces de entrada y salidas (E/S).

Son los que proporciona el vínculo entre la CPU del controlador y los dispositivos de campo del sistema. A través de ellos se origina el intercambio de información ya sea para la adquisición de datos o la del mando para el control de maquinas del proceso.

a) Tipos de módulos de entrada y salida

Debido a que existen gran variedad de dispositivos exteriores (captadores actuadores), encontramos diferentes tipos de módulos de entrada y salidas, cada uno de los cuales sirve para manejar cierto tipo de señal (discreta o analógica) a determinado valor de tensión o de corriente en DC o AC.

Módulos de entradas discretas

- Módulos de salidas discretas
- Módulos de entrada analógica
- Módulos de salida analógica

5.5.1.4 Módulos de memorias

Son dispositivos destinados a guardar información de manera provisional o permanente. Se cuenta con dos tipos de memorias:

1. Volátiles (**RAM**)
2. No volátiles (**EPROM y EEPROM**)

5.5.1.5 Unidad de programación

Los terminales de programación, son el medio de comunicación entre el hombre y la máquina; estos aparatos están constituidos por teclados y dispositivos de visualización

Existen tres tipos de programadores los manuales (**Hand Held**) tipo de calculadora, los de video tipo (**PC**), y la (**computadora**).

5.5.2 Descripción de hardware a utilizar

A continuación se describirán los componentes propuestos para la automatización de un sistema de aire comprimido.

5.5.2.1. Controlador Programable Micrologix 1200

Para la automatización del sistema de aire comprimido se propone utilizar un 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.

Se selecciona el controlador Micrologix 1200 1762-L40AWA que cuenta con 24 entradas de tipo 120 VCA y 16 salidas a Relé de la tabla de datos mostrada:

Tabla No. V
PLC Micrologix 1200

Familia de controladores		Entradas		Salidas	
		Cantidad	Tipo	Cantidad	Tipo
Controladores MicroLogix 1200:	1762-L24BWA	14	24 VCC	10	Relé
	1762-L24AWA	14	120 VCA	10	Relé
	1762-L24BXB	14	24 VCC	10	5 relé 5 FET
	1762-L40BWA	24	24 VCC	16	Relé
	1762-L40AWA	24	120 VCA	16	Relé
	1762-L40BXB	24	24 VCC	16	8 relé 8 FET
Bases MicroLogix 1500	1764-24BWA	12	24 VCC	12	Relé
	1764-24AWA	12	120 VCA	12	Relé
	1764-28BXB	16	24 VCC	12	6 relé 6 FET
PLC micrologix 1200					

Fuente: Controladores Programables Micrologix 1200 & 1500, Publicación 1762-RM001D-ESP, Octubre 2002. Pág. 89.

Con este controlador evitamos el uso de paneles de expansión y contamos con entradas adicionales para posibles expansiones de las funciones.

Este controlador es el más recomendado para autorización de equipos sencillos por su velocidad de procesamiento y por ser uno de los PLC más comerciales actualmente.

5.5.2.2. Modulo de entradas y salidas

Muchas de las funciones especiales no son soportadas por los módulos normales de los PLC, para estas situaciones los fabricantes ofrecen una gran variedad de elementos adicionales que permiten incorporar funciones especiales al PLC para nuestros procesos.

a) Módulos de I/O análogos:

Una E/S analógica es un circuito en el que la señal puede variar continuamente entre límites especificados. El modulo convierte señales analógicas en valores binarios de 16 bits que se almacenan en la tabla de imagen de entrada al procesador SLC. El rango decimal, el número de bits significativos y la resolución del convertidor dependen del rango de entrada que se utilice para el canal.

El módulo contiene un bloque de terminales extraíbles que proporciona una conexión con los canales analógicos de entrada y/o salida, diseñado específicamente como interface con las señales de entrada de corriente y de voltaje. Los canales pueden conectarse bien de forma unipolar o bien como entrada diferencial. La tarjeta de circuitos incorpora micro interruptores que permiten seleccionar la entrada de corriente o de voltaje.

Estos módulos permiten manejar entradas y salidas analógicas en el PLC para poder efectuar lecturas y control analógico de variables en los procesos; las entradas y salidas analógicas se caracterizan, generalmente por:

Resolución

Depende de la cantidad de bits del convertor análogo digital utilizado, generalmente se requiere una resolución no inferior a 10 bits.

1) Tiempo de conversión

Es el tiempo empleado en convertir el valor analógico en su correspondiente valor discreto. Este factor es muy importante ya que define el tipo de aplicación para el cual puede emplearse el módulo.

En algunos controles de procesos, la velocidad de variación de las variables es relativamente lenta, sobre 1 segundo, por lo cual las exigencias de velocidad en los módulos analógicos no son muy exigentes.

2) *Número de canales*

Es la cantidad de entradas o salidas que puede manejar el módulo, generalmente están agrupadas en 4 o más I/O. También existen agrupaciones de entradas y salidas agrupadas en un solo módulo.

3) *Tipo de entrada*

Es el tipo de entrada que maneja el módulo, estas pueden ser Entrada o Salida en corriente, 4-20 mA, 0-20 mA, en tensión, 0 – 10V, 0 – 5V, termocupla, pt100.

b) 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 No. VI
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 32676	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

Fuente: Allen Bradley, Digital I/O Modules, Publicación 1746-IN005B-EN-P, Estados Unidos, 2002, Pág. 75.

La siguiente ecuación sirve para calcular el valor en voltios de la magnitud de la señal de entrada. $10 \text{ V}/32768$

* *valor de entrada* = 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.

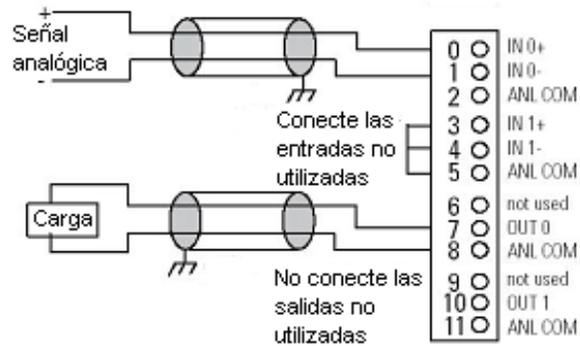
Tabla No. VII
Características del convertidor D/A de los canales de salida del módulo NIO4I.

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 μ A
0 a 20 mA	0 a 31,208	12.92 bits	2.56348 μ A
4 a 20 mA	6,242 a 31,208	12.6 bits	2.56348 μ A

Fuente: Allen Bradley, Digital I/O Modules, Publicación 1746-IN005B-EN-P, Estados Unidos, 2002, Pág. 75.

La figura 59 muestra cómo se realizan las conexiones en este módulo.

Figura 59
Alambrado del módulo de entradas/salidas analógicas.



Fuente: Allen Bradley, **Digital I/O Modules**, Publicación 1746-IN005B-EN-P, Estados Unidos, 2002, Pág. 76

La siguiente ecuación sirve para calcular el valor decimal que debe ser movido a la imagen de salida, para obtener una señal de salida con una magnitud en miliamperes. $32768/21\text{mA} * \text{corriente deseada (mA)} = \text{valor decimal a grabar}$.

Tabla No. VIII
Técnicas del módulo de entradas y salidas analógicas del
módulo NIO4I

Descripción	Especificación
Formato de comunicación SLC	Binario de complemento a 2 de 16 bits
Cableado de campo a aislamiento del chasis	500 VCC
Tiempo de actualización	512 us para todos los canales en paralelo
Cable recomendado	Belden #8761 blindado
Ubicación	Chasis 1746
Calibración	Calibrado de fábrica
Calibre máximo del cable	# 14 AWG (max)
Condiciones ambientales: Temperatura de funcionamiento Temperatura de almacenamiento Humedad relativa	De 0 a +60grad.C (+32 a +140 grad. F) De -40 a +85 grad. C (-40 a +185 grad. F) De 5 a 95% (Sin consideración)

Fuente: Allen Bradley, Digital I/O Modules, Publicación 1746-IN005B-EN-P, Estados Unidos, 2002, Pág. 76.

5.5.2.3. Módulos de comunicaciones y red

Las aplicaciones en la actualidad ya no pueden considerarse aplicaciones aisladas en el proceso global, más aún, es necesario supervisar y monitorear las distintas variables que intervienen en el proceso.

Para la visualización o monitoreo de variables en un PLC se puede optar por una pantalla de diálogo hombre-máquina o por la comunicación hacia un computador personal con software dedicado de desarrollo local o software de supervisión gráfica comercial. Cualquiera de las alternativas, requiere de interfaces de

comunicaciones apropiadas para el establecimiento de la comunicación.

5.5.3. Variador de frecuencia

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 IGBT dependiendo de la velocidad que se desea o que haya sido programada.

5.5.3.1. 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.

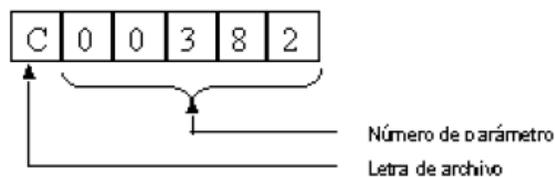
A través de dichos parámetros es que se configura al equipo para ser comandado desde el PLC y controlar la velocidad de la máquina a través de un potenciómetro. Para configurar el variador a fin de que funcionara de la manera

específica requerida, se debieron establecer algunos de los parámetros del variador. Existen tres tipos de parámetros:

- a) 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.
- b) 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.
- c) 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 No. 60

Presentación de los parámetros en pantalla del HIM



Fuente: Manual de usuario, PowerFlex 70, 20A-UM001L-ES-P, Variador de frecuencia ajustable de CA, Allen Bradley. Pág. 89.

5.5.3.2 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:

- a) 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.
- b) Pulsar enter. Aparece entonces el parámetro que se vio la última vez. La letra del archivo parpadeará.
- c) Pulsando las flechas hacia arriba o hacia abajo puede desplazarse por los archivos.
- d) Pulsando enter se puede introducir un archivo. El dígito derecho parpadeará.
- e) 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.
- f) 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.
- g) Pulse enter para entrar al modo de edición. El dígito derecho parpadeará si se puede editar.
- h) 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.

- i) 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.
- j) Pulse esc para regresar a la lista de parámetros.

5.5.3.3. 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 No. IX
Parámetros del variador de frecuencia.

Archivo	Numero de parámetro	Nombre	Descripción	Valor aproximado o de programación
B	041	Motor NP Volts	Voltaje en la placa del motor a conectar	240 V
B	042	Motor NP FLA	Corriente a plena carga en la placa del motor	Dados por diseñador
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	Según Diseño del motor
B	045	Motor NP Power	Potencia en la placa del motor	50Hp

C	081	Mínimum Speed	Establece el límite inferior de la referencia de velocidad después de que se ha aplicado el escalamiento	20 Hz
C	082	Máximum Speed	Establece el límite superior de la referencia de velocidad después de 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	1 seg
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 Pág. 102.

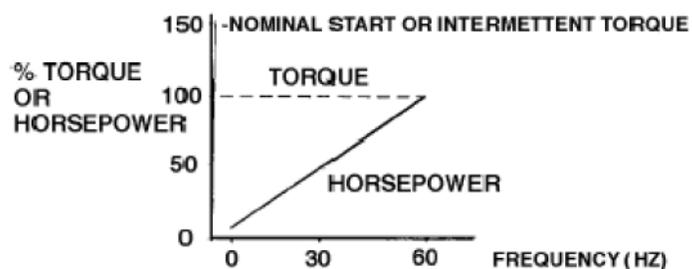
La selección de los límites de frecuencia a utilizar dependerá del tamaño del motor del compresor así de cómo de las dimensiones del sistema de aire comprimido, los límites sugeridos para la automatización se obtiene de la observación de la grafica de par vs frecuencia de un motor de inducción normalizado, 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.

Figura No. 61

Relación par vs frecuencia para un motor de inducción conectado a una carga de par constante



Fuente: AC and DC drive Applications, Control Techniques Worldwide, Pág 130.

5.6. 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

5.6.1 Requisitos mínimos del sistema

Para poder utilizar este software sin problemas se requiere tener un sistema con las siguientes características como mínimo:

- a) Intel Pentium II® o superior
- b) 128 MB de RAM para Windows NT, Windows 2000, o Windows XP (64 MB para Windows 98®)
- c) 45 MB de espacio de disco duro disponible • Monitor y adaptador gráfico SVGA 256-color con resolución 800x600 • CD-ROM drive.
- d) Disquetera de 3.5 pulgadas (solo para la activación del programa mediante la llave) • Cualquier dispositivo de señalamiento compatible con Windows
- e) RSLinx™ (software de comunicación) versión 2.31.00 o posterior.

5.6.2. 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.

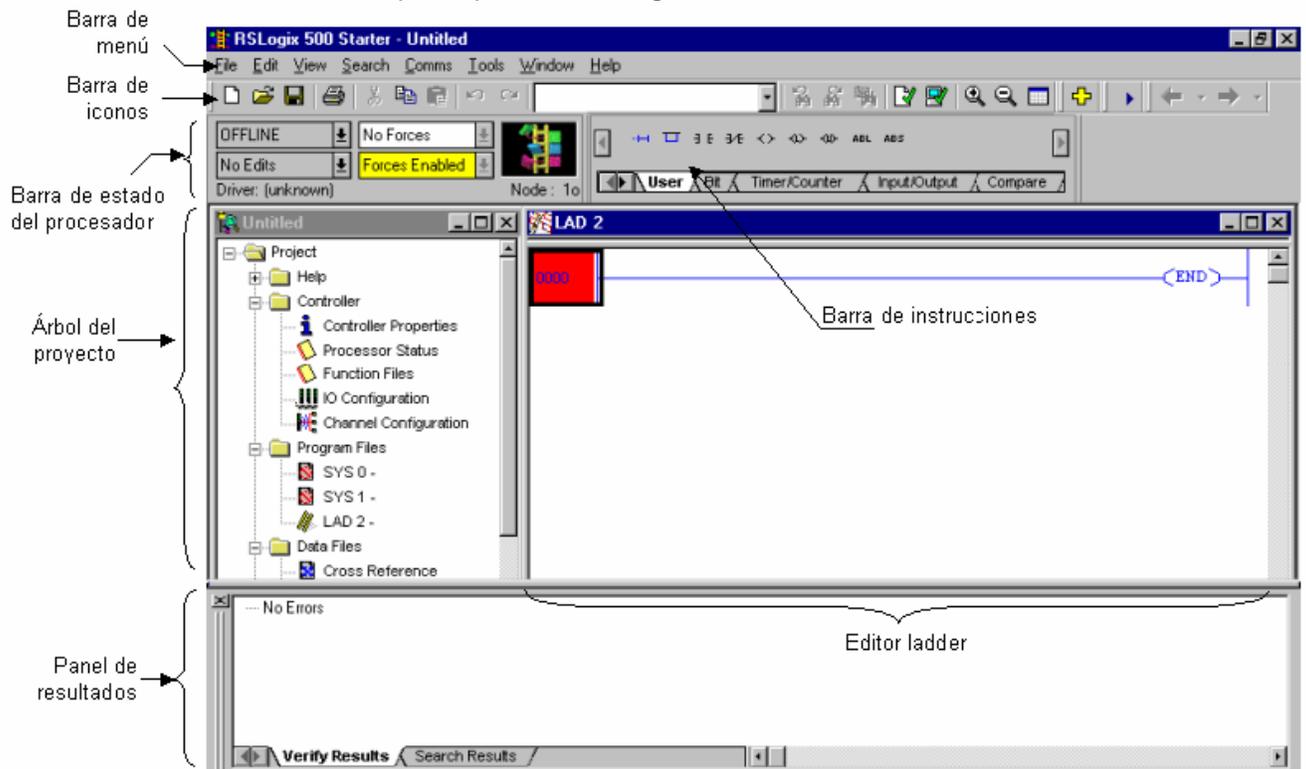
Las instrucciones básicas se dividen en tres grupos: bit, temporizador y contador. También existen los siguientes tipos de instrucción: comparación, matemáticas, manejo de datos, flujo de programa, contador de alta velocidad, comunicación, escalamiento, PID, ASCII, etc.

5.6.3. Descripción general del software

RSLogix 500 es el software destinado a la creación de programas de autómatas en lenguaje de esquema de contactos o también llamado lógica de escalera (*Ladder*). Incluye editor de *Ladder* y verificador de proyectos (creación de una lista de errores) entre otras opciones. Este producto se ha desarrollado para funcionar en sistemas operativos Windows. Existen diferentes menús de trabajo

(figura 3.46) en el entorno de RSLogix 500, a continuación se hace una breve explicación de los mismos:

Figura No.62
Vista principal de RSLogix 500



Fuente: : Elaboración propia en base al Sotware RSLogix 500.

a) Barra de menú

Permite realizar diferentes funciones como recuperar o guardar programas, opciones de ayuda, etc. es decir, las funciones elementales de cualquier software actual.

b) Barra de iconos

Engloba las funciones de uso más común y repetido en el desarrollo de los programas.

c) Barra de estado del procesador

Nos permite visualizar y modificar el modo de trabajo del procesador (PLC) (*online, offline, program, remote*), cargar y/o descargar programas (upload/download program), así como visualizar el controlador utilizado (*Ethernet driver* en el caso actual).

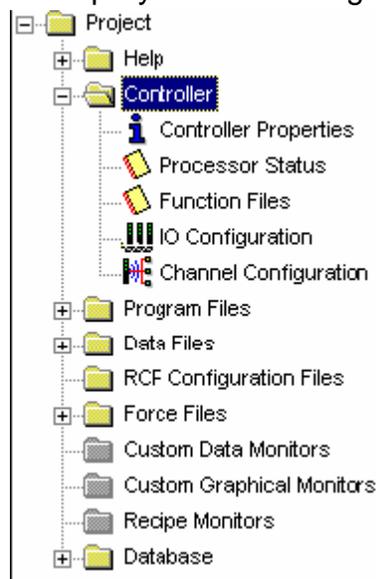
Los modos de trabajo más usuales son:

- 1) *Offline*: consiste en realizar el programa sobre un ordenador, sin necesidad alguna de acceder al PLC para una vez finalizado y verificado el programa descargarlo en el procesador, permitiendo al programador tener un cierto grado de independencia a la hora de realizar la programación.
- 2) *Online*: la programación se realiza directamente sobre la memoria del PLC, de manera que cualquier cambio que se realice sobre el programa afectará directamente al procesador, y con ello a la planta que controla. Este método es de gran utilidad para el programador experto y el personal de mantenimiento ya que permite realizar modificaciones en tiempo real y sin necesidad de parar la producción.

d) Árbol del proyecto

Contiene todas las carpetas y archivos generados en el proyecto, estos se organizan en carpetas. A continuación las más importantes:

Figura No. 63
Árbol de proyecto de RSLogix 500



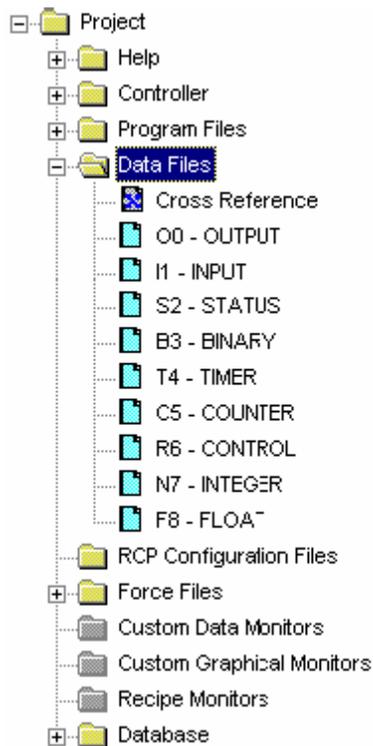
Fuente: : Elaboración propia en base al Software RSLogix 500

- 1) *Controller properties*: contiene las prestaciones del procesador que se está utilizando, las opciones de seguridad que se quieren establecer para el proyecto y las comunicaciones.
- 2) *Processor status*: se accede al archivo de estado del procesador
- 3) *I/O configuration*: se podrán establecer y/o leer los módulos adicionales de entradas/salidas o tarjetas que conforman el sistema.
- 4) *Channel configuration*: permite configurar los canales de comunicación del procesador.

La carpeta program files es donde se crean las distintas subrutinas Ladder para el proyecto, también da acceso a los datos de programa que se van a utilizar así como a las referencias cruzadas (cross references).

En el programa se puede crear, configurar y consultar salidas (output), entradas (input), variables binarias (binary), temporizadores (timer), contadores (counter), etc. Todos estos archivos se almacenan en la carpeta data files del árbol del proyecto.

Figura No. 64
Carpeta data files



Fuente : : Elaboración propia en base al Software RSLogix 500

Presionando doble click en cualquiera de estas opciones se ingresa a la ventana archivo de datos, es aquí donde se configura los nombres, símbolos y direcciones de las diferentes variables que se utilizaran en las distintas instrucciones de programa.

e) Panel de resultados:

En esta ventana aparecen los errores de programación que surgen al ejecutar la compilación del programa a través de los iconos (situados en la barra de iconos); efectuando doble clic sobre el error, automáticamente el cursor se situará sobre la ventana de programa Ladder en la posición donde se ha producido tal error.

f) Barra de instrucciones

Esta barra le permitirá, a través de pestañas y botones, acceder de forma rápida a las instrucciones más habituales del lenguaje Ladder. Presionando sobre cada instrucción, ésta se introducirá en el programa Ladder.

g) Ventana del programa Ladder

Contiene todos los programas y subrutinas Ladder del proyecto. Se puede interaccionar sobre esta ventana escribiendo el programa directamente desde el teclado o ayudándose con el ratón (ya sea

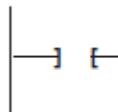
arrastrando objetos procedentes de otras ventanas ó seleccionando opciones con el botón derecho del ratón).

5.6.4. Descripción de funciones a utilizar.

- a) 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.

- b) Examina si cerrado (XIC): Se usa la instrucción XIC en el programa de escalera para determinar si un bit está activado. Cuando la instrucción se ejecuta, si el bit direccionado está activado (1), entonces la instrucción es evaluada como verdadera. Cuando se ejecuta la instrucción, si el bit direccionado está desactivado (0), entonces la instrucción se evalúa como falsa.

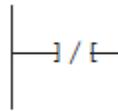
Figura No. 65
Instrucción XIC



Fuente: Allen Bradley, Manual Micrologix 1000 con software de programación, Estados Unidos. Pág. 87.

- c) Examina si abierto (XIO): se usa la instrucción XIO en el programa de escalera para determinar si un bit está desactivado. Cuando la instrucción se ejecuta, si el bit direccionado está desactivado (0), entonces la instrucción se evalúa como verdadera. Cuando se ejecuta la instrucción, si el bit direccionado está activado (1), entonces la instrucción se evalúa como falsa.

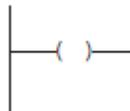
Figura No. 66
Instrucción XIO



Fuente: Allen Bradley, Manual Micrologix 1000 con software de programación, Estados Unidos. Pág. 67.

- d) Activación salida (OTE): la instrucción OTE se usa en el programa de escalera para activar un bit cuando las condiciones de renglón se evalúan como verdaderas. Un ejemplo de un dispositivo que se activa o desactiva es una salida cableada a una luz piloto (direccionada como O0:0/4).

Figura No. 67
Instrucción OTE



Fuente: Allen Bradley, Manual Micrologix 1000 con software de programación, Estados Unidos. Pág. 98.

- e) 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.

- f) 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.

5.6.5. Instrucciones para la manipulación de datos:

- a) 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.
 - 1) Los parámetros de este bloque son:
 - 2) 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.

- b) 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 en RSLogix 500

Al estructurar la memoria interna del PLC, se debe nombrar y especificar las direcciones de las variables incluyendo el tipo de dato que se le asignara. A la vez se recomienda para llevar un mejor control y no confundirse hacer una breve descripción del uso que se le dará en el programa. A continuación se hace un resumen en la tabla No. 10 y No. 11.

Tabla No. X

Direcciones utilizadas en la estructura de la memoria del PLC

Dirección	Tipo de Archivo	Tipo de dato	Descripción
I0:0/1	Entrada	Digital	Apagado
I0:0/0	Entrada	Digital	Encendido
B3:0/0	Bit	Bit	Comprobación de Encendido
I0:0/2	Entrada	Digital	Presostato lado de alta
I0:0/3	Entrada	Digital	Presostato lado de baja
B3:0/1	Bit	Bit	Comprobación de estado los presostatos
I1:0/0	Entrada	Entrada	Imagen de entrada: Variable controlada
N10:0	Entero	Entero	Valor temporal de consigna
N10:1	Entero	Entero	Valor temporal de Consigna
N7:0	Entero	Entero	Variable Controlada
N7:-N7:31	Entero	Entero	Bloque de parámetros de

			función PI
N7:31	Entero	Entero	Salida del controlador
O1:0/0	Salida	Salida	Imagen de salida: Hacia VF

Fuente: Elaboraron Propia. Año 2010

Tabla No. XI
Direcciones utilizadas en la memoria de la función PI

Nombre	Tipo	Descripción	Dirección de memoria PLC	Ámbito
Set Poit	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
KC	Entera	Ganancia de Controlador	N7:3	1-32767

Fuente: Elaboración Propia. Año 2010

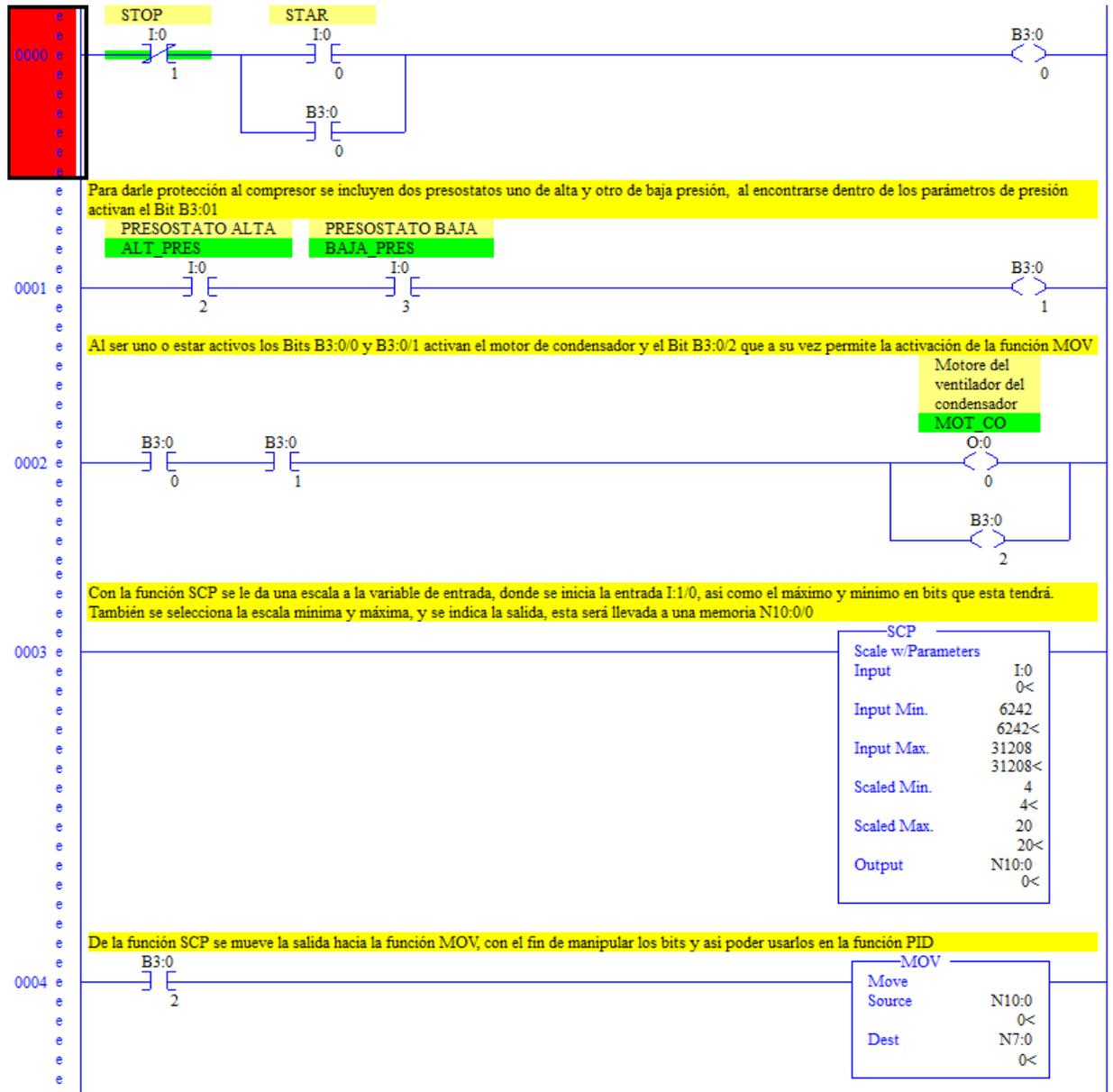
Para las señales de entrada se tiene los siguientes parámetros:

- Señal de entrada: 4 – 20 ma
- Señal de salida: 4 – 20 ma
- Alimentación de entrada: 120 Vac, 60 Hz

5.7.1 Programa en escalera

Definidos 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.

Figura No. 68
Programa en escalera



2. Al ser uno o estar activos los Bits B3:0/0 y B3:0/1 activan el motor de condensador y el Bit B3:0/2 que a su vez permite la activación de la función MOV.
3. Con la función SCP se le da una escala a la variable de entrada, donde se inicia la entrada I:1/0, así como el máximo y mínimo en bits que esta tendrá. También se selecciona la escala mínima y máxima, y se indica la salida, esta será llevada a una memoria N10:0/0.
4. De la función SCP se mueve la salida hacia la función MOV, con el fin de manipular los bits y así poder usarlos en la función PID.
5. En esta función PID se deben ingresar correctamente los parámetros de archivos PI, e indicar de donde bien de donde viene la variable del proceso y la variable controlable.
6. Nuevamente utilizamos la función MOV para mover la variable de salida hacia la función de escalamiento SCP.
7. En el siguiente bloque de SCP, se trae la variable de la función PID hacia la salida por medio de la función MOV, y se dirige hacia el variador de velocidad.

5.8 Estimación del ahorro de energía

La energía eléctrica representa el principal insumo que mueve al mundo industrial; sin ella, nuestras empresas se detendrían y las economías enteras entrarían en crisis. Por eso es vital saber administrarla. En el sector comercial-industrial el costo de la energía suele ser uno de los más significativos en el presupuesto de gastos, por tanto, al reducir este costo

se impacta de manera importante el presupuesto anual. El Ahorro de Energía presenta una mayor rentabilidad de la empresa, lo que lo pone como un mejor competidor en el mercado, ya que con el ahorro logra disminuir los gastos de producción.

5.8.1 Costo de la energía.

La facturación por energía deberá seguir un proceso y una forma de cobro en base a los precios establecidos en una base legal entre las empresas de electricidad y la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) y las autoridades del país regidas en base a los reglamentos de las anteriores entidades. El AMM es el encargado de regular, quien vende y a qué horas, la energía al usuario final. Los precios son sujeto de ajustes trimestrales según la variabilidad de la económica y los precios de los combustibles a nivel internacional.

En la siguiente tabla, que es parte del pliego tarifario de EEGSA Tabla No. 4, se muestra los costos de energía y potencia para una industria con baja demanda en punta:

Tabla No. XII

Pliego tarifario EGSSA, de baja tensión con demanda en punta

BAJA TENSION Con Demanda en Punta - BTDP	
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	198.444246
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)	1.384200
Cargo Unitario por Potencia Máxima (Q/kW-mes)	55.057735
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	80.577335

Fuente: Pliego tarifario EEGSA baja tensión con demanda, CNEE resolución Ago-Oct, 2010.

5.8.1.2 Cálculo de facturación.

La cuota de facturación es igual a la sumatoria de cargos, estableciéndose como

$$\mathbf{CB + CE + PM + PC}$$

Donde:

- a) CB = Cargo Base
- b) CE = Cuota por Energía
- c) PM = Cuota por Potencia Máxima del mes
- d) PC = Cuota por Potencia Contratada

Además:

- a) Tasa municipal que depende de la municipalidad que presta el servicio
- b) Impuesto al Valor Agregado IVA 12%
- c) Bajo factor de potencia, en caso de Industria no aplica a domiciliar

- d) Exceso de demanda contratada, solo para industria y algunos casos domiciliar
- e) Mora (1.1% mensual)

Prácticamente pagamos por todo, desde el mantenimiento de la red hasta las pérdidas de energía que se dan en la transmisión. Claramente se ve que el sistema de cobro suele ser complejo y algunas veces difícil de comprender, pero basta con darle un vistazo al recibo de energía que recibe en su casa para darse cuenta de cada dato de cobro.

5.8.1.3 Potencia del compresor y especificaciones.

Los compresores Carlyle 05T y 06T son de doble tornillo accionado por un engranaje, el cual ofrece las ventajas de tener un peso ligero y ocupar un volumen cúbico pequeño. Una de las características clave de los compresores de tornillo Carlyle es que todos los modelos semi-herméticos tienen las mismas dimensiones físicas y ubicaciones de puertos, al igual de todos los modelos de accionamiento abierto.

Este tipo de compresores tiene la capacidad de controlar su capacidad de manera precisa para la demanda de aire necesaria. Esto significa que la velocidad de rotación del compresor corresponde exactamente a los requisitos de

aire. El compresor de tornillo Carlyle es compatible con los accionamientos inversores, los que varían la velocidad del compresor para mejorar la adecuación de carga del sistema. A continuación se presentan los límites de velocidad que se permite en estos compresores:

Tabla No. XII

Límites de velocidad variables para compresores 06TR de baja temperatura.

no. de modelo	potencia HP nom.	Hz mín.	Hz máx.
06TRC033	20	50	70
06TRD039	25	40	70
06TRD044	30	35	70
06TRE048	30	30	70
06TRE054	35	30	70
06TRF065	35	25	70
06TRG078	40	20	68
06TRH088	50	20	60

Fuente: Guía de aplicación para compresores de tornillo 05T/06T, Carlyle. Pág. 45

Tabla No. XIV

Límites de velocidad variables para compresores
06TR de alta temperatura.

no. de modelo	potencia HP nom.	Hz mín.	Hz máx.
06TRC033	15	50	70
06TRD039	20	40	70
06TRD044	20	35	70
06TRE048	25	30	70
06TRE054	25	30	70
06TRF065	30	25	70
06TRG078	35	20	68
06TRH088	40	20	60

Fuente: Guía de aplicación para compresores de tornillo 05T/06T, Carlyle.
Pág.46.

Los inversores son una herramienta efectiva para adecuar las cargas de sistema eficientemente a los compresores de tornillo. Deben considerarse el tamaño del motor y las capacidades para su enfriamiento cuando se usa un inversor para incrementar las velocidades más allá de 60 Hz. Al atenerse a estos lineamientos se obtendrá una mejora del diseño y del rendimiento del sistema. Un inversor puede cambiar muy rápidamente la velocidad del compresor desde la mínima hasta la máxima y viceversa. Con excepción de la rampa de inversor que existe durante el arranque del compresor, Carlyle recomienda limitar el ritmo de cambio de velocidad a 600 rpm/min para los modelos 06T semi-herméticos. El ritmo de cambio de la velocidad de los compresores 05T con accionamiento abierto no debe ser mayor de 500 rpm/min. 06TRH088

5.8.1.4 Ciclado del compresor

Aunque el ciclado del compresor es una manera efectiva de controlar su capacidad, los arranques y paros frecuentes reducen su vida útil. Los compresores de tornillo Carlyle no deberían ciclarse con fines de control de capacidad por más de seis veces por hora y deberían estar operando por los menos durante 5 minutos después de cada arranque.

5.8.2 Cálculo del consumo de energía

Para el cálculo de consumo de energía es primordial conocer 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. El sistema actual de la planta está funcionando con controles de carga/descarga (load/unload) que mantienen trabajando continuamente el compresor a velocidad constante, dejándolo sin carga cuando la presión de descarga alcanza el valor requerido. Los fabricantes emplean diferentes sistemas para descargar al compresor, pero el compresor sigue con el consumo de potencia en vacío.

Por medio de la automatización se ofrecerá la ventaja, de poder hacer trabajar al compresor a una velocidad optima 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. A continuación se ilustrara la forma de calcular los costos de operación y de ahorro energético.

Tomaremos por ejemplo un compresor marca Carlyle, con número de modelo de 06TRH088 para bajas temperaturas, con un motor de 50 Hp.

a) Cálculo de la potencia consumida por el motor del compresor a una demanda maxima: Encontramos la potencia del motor del compresor que se encuentra en la planta, el compresor que utilizaremos es de 50 Hp por lo que la potencia consumida del sistema de aire comprimido con un solo compresor será de:

$$P= 50 \text{ hp} \cdot 0.746$$

$$P= 37.3 \text{ Kw}$$

Tabla No. XV

Resumen del cálculo potencia del motor

Potencia	Constante	Pot en Kw
50	0.746	37.3

Fuente: Elaboración Propia. Año 2010

Costo aproximado de la energía anual: calculando el consumo de energía anual que tendría el sistema de aire comprimido, tomando en cuenta de que este estará

funcionando las 24 horas del día, durante todo el año (365 días) y de la tabla No. 12 tenemos que el costo de energía según EGGSA es de 1.384200 (Q/kwh), se tendría lo siguiente:

$$\text{Costo} = 37.3 \text{ (Kw)} * 24 \text{ (h)} * 365 \text{ (días)} * 1.384200 \text{ (Q/kwh)}$$

$$\text{Costo} = 452,284.58 \text{ quetzales anuales}$$

Entonces sabemos que el costo de anual de la energía consumida por el sistema es de 452284.58 quetzales.

Tabla No. XVI

Resumen del cálculo energía consumida al año.

Potencia en Kw	Costo Q/Kwh	Tiempo anual, en horas	Costo en Q. anual.
37.3	1.3842	8760	452284.58

Fuente: Elaboración propia. Año 2010

b) Cálculo de la Potencia consumida por el motor del compresor tomando en cuenta la demanda de la planta: Ahora se toma en cuenta el tiempo que pasa funcionando el mismo motor según la demanda de la planta, la demanda varía según la hora del día, esto se debe a que no a todas horas se encuentra el mismo personal en la planta ni se tiene funcionando las mismas máquinas, por lo que no toda la maquinaria y sistema que utilizan el aire comprimido están funcionando. Se hace la estimación de que de las 24 horas del día, 8 horas está funcionando a plena carga es decir que el motor está trabajando a sus 50 Hp, y el resto las 16 horas, en promedio la planta demanda de este motor 30 Hp

únicamente, esta capacidad la puede suministrar el motor gracias al variador de frecuencia. Ahora se hacen los cálculos anteriores con los diferentes consumos. De la potencia del motor de 50 Hp en Kw se tiene que $P = 37.3 \text{ Kw}$

Se realizan los cálculos para 30 Hp

$$P = 30 \text{ hp} \cdot 0.746$$

$$P = 22.38 \text{ Kw}$$

Calculando el consumo de energía anual que tendría el sistema de aire comprimido ya automatizado, tomando en cuenta que la planta demanda lo 50 Hp en 8 horas y 30 Hp en 16 horas del día, durante todo el año (365 días) de la tabla No. 12 tenemos que el costo de energía según EGGSA es de 1.384200 (Q/kwh), se tendría lo siguiente:

$$\text{Costo} = (37.3 \text{kw} \cdot 8 \text{h} + 22.38 \text{kw} \cdot 16 \text{h}) \cdot 365 \text{ (días)} \cdot 1.384200 \text{ (Q/kwh)}$$

$$\text{Costo} = (298.4 \text{kwh} + 358.08 \text{kwh}) \cdot 365 \text{ (días)} \cdot 1.384200 \text{ (Q/kwh)}$$

$$\text{Costo} = (656.48 \text{kwh}) \cdot 365 \text{ (días)} \cdot 1.384200 \text{ (Q/kwh)}$$

$$\text{Costo} = 331,675.36 \text{ Quetzales anuales}$$

Entonces el costo de anual de la energía consumida por el sistema ya automatizado es de 331,675.36 quetzales anuales.

Ahorro obtenido: con estos datos se compara el ahorro obtenido con la automatización

$$\text{Ahorro} = 452,284.58 - 331,675.36 \text{ quetzales anuales}$$

Ahorro = 120,609.22 quetzales anuales

Con esto se ve que el ahorro es de 120, 609.22 quetzales al año en el consumo de energía eléctrica.

De esto se puede sacar el porcentaje de ahorro que se obtiene con el sistema automatizado.

$$\text{Ahorro en porcentaje} = \frac{120,609.22}{452,284.58} * 100$$

Ahorro en porcentaje = 27 %.

Con los cálculos anteriores se comprueba que se tiene un ahorro del 27 por ciento de energía consumida, lo que es significativo en los gastos de producción de una planta. A continuación se presenta un resumen de la energía consumida al año con el sistema automatizado.

Tabla No. XVII

Resumen del cálculo de energía consumida al año con el sistema automatizado

Potencia en Kw	Costo Q/Kwh	Tiempo anual, en horas	Costo en Q. anual.
22.38	1.3842	5840	180,913.8326
37.3	1.3842	2920	150,761.5272
Total energía consumida			331,675.3598

Fuente: Elaboración propia. Año 2010

c) Costo de potencia máxima y potencia contratada: a continuación se calcula los costos que se dan por el arranque del motor, si se realiza un arranque directo a la red, tendríamos un

múltiplo de 3 para la potencia, de la Tabla No. 12 tomamos el costo de potencia máxima que es de 55.057735 (Q/Kwh-mes) y un costo de potencia contratada de de 80.577335 (Q/kw –mes), el costo de potencia por arranque se tiene de la siguiente manera:

$$\text{Costo} = 37.3 \text{ (Kw)} * (55.057735 + 80.577335 \text{ (Q/kw –mes)}) * 3$$

$$\text{Costo} = 15177.56433 \text{ quetzales por mes.}$$

Entonces el costo anual por potencias es de:

$$\text{Costo} = 15177.56433 * 12$$

$$\text{Costo por potencias} = 182,130.8 \text{ quetzales por año.}$$

Tabla No. XVIII
Resumen del cálculo energía
Consumida por arranque al año.

Potencia en Kw	Potencia máxima en (Q/Kwh-mes)	Potencia contratada en Q/Kwh-mes	Múltiplo de arranque en directo	Tiempo en mese	Costo en Q. anual.
37.3	55.057735	80.577335	3	12	182130.8

Fuente: Elaboración Propia. Año 2010

En la tabla siguiente encontramos un resumen del costo de potencia y de energía en quetzales que se consume un motor de 50 Hp al año, si se mantiene funcionando las 24 horas, se calcula de esta manera con el fin de poder realizar una comparación con el ahorro que representa al instalar un variador de frecuencia.

Tabla No. XIX
Resumen de costo de potencia y energía.

Detalle	Pecio	Consumo	Costo anual
Por energía	1.384200 (Q/kwh)	37.3 kw	452,284.5816
Por Potencia máxima anual	55.057735 (Q/Kwh-mes)*3	37.3 kw	73,931.52656
Por Potencia Contratada Anual	80.577335 (Q/kw –mes)*3	37.3 kw	108,199.2454
Total gasto anual de energía en quetzales			634,415.3536

Fuente: Elaboración Propia. Año 2010

La demanda de aire comprimido puede variar considerablemente en diferentes momentos. Distintos estudios indican que como media, se emplea nada más que el 50-70% de la capacidad máxima. Con un compresor estándar esto significa un cambio permanente entre el funcionamiento en carga y en vacío y por consiguiente un gran desperdicio de energía.

Por medio de la variación de velocidad del motor, los compresores con velocidad variable, pueden suministrar la cantidad de aire inmediatamente solicitada a la utilización, dentro de los límites de velocidad programados por el proyecto del fabricante. De esa manera el consumo de energía vuelve directamente proporcional a la utilización del aire comprimido. Entonces, el funcionamiento a velocidad variable está sin duda más ventajoso en el caso de aplicaciones donde el consumo de aire es muy variable, se ha calculado que se puede llegar a tener un ahorro en energía 27% anualmente, en la siguiente tabla se muestra el ahorro total que se obtendrá a través de la automatización tomando en cuenta el ahorro en energía y potencia:

Tabla No. XX
Comparación de ahorro de energía y potencia en quetzales

Gasto de energía anual		Ahorro del 27% en quetzales
Sin automatización	Con automatización	
452,284.5816	331,675.3598	120,609.222
Gasto de potencia		
182,130.772	132,955.4636	49,175.3084
TOTAL AHORRO EN QUETZALES		169,784.53

Fuente: Elaboración Propia. Año 2010

El ahorro que se tiene al utilizar un variador de frecuencia en un motor de 50Hp es de 169,784.53 quetzales, a continuación se realizara el listado de lo que se invertirá en la implementación del variador.

Tabla No. XXI
Inversión en la automatización.

Cantidad	Articulo	Descripción	Precio en Q.
1	CPU	Micrologix 1500, de 24 entradas, 120 VAC 12 salidas a Relé	670.00
1	Modulo de entradas analógicas	Entradas 4 1769 IF4	550.00
1	Cable	Comunicación PC-PLC	315.00
1	Sensor	Transductor de presión	225.00
1	Software PLC	RSLogix 1200	1300.00
Mano de obra			20,000.00
1	Variador de frecuencia	Telecomecanique, Variador de velocidad 3F, 200-240 VCA.	11,800.00
TOTAL DE GASTO EN QUETZALES			34,860.00

Fuente: Elaboración Propia. Año 2010

Con los datos ya adquiridos podemos encontrar el tiempo en que se recupera la inversión realizada para la automatización, para conocer este dato se divide el total de la inversión dentro del ahorro anual ya estimado de la energía.

$$\begin{aligned} \textit{Tasa de retorno} &= \frac{\textit{Costo de la implementación}}{\textit{Ahorros obtenidos anualmente}} \\ \textit{Tasa de retorno} &= \frac{\mathbf{34860.00}}{\mathbf{169,784.53}} \end{aligned}$$

$$\textit{Tasa de retorno} = 0.2053190593984034 \textit{ años}$$

Estos cálculos muestran que la recuperación de la inversión es bastante rápida se realizara en aproximadamente 2 meses y medio. Se tiene un ahorro en energía eléctrica de 169,784.53 quetzales, esta es una suma importante en el presupuesto de la empresa.

CONCLUSIONES

1. Al implementar el proceso actual de carga/descarga a un proceso de control continuo, monitoreando constantemente la presión del sistema, se logra disminuir el consumo de energía.
2. Para realizar la automatización, se utiliza la medición de la presión que se encuentra en el tanque de almacenamiento como variable controlable y la velocidad a la que gira el motor del compresor como la variable manipulable. Del control de la presión y de la precisión con la que se mida, depende la funcionalidad del sistema de control.
3. La demanda de aire comprimido puede variar considerablemente en diferentes momentos. Los compresores se instalan con una capacidad mucho mayor a la que normalmente se encuentran trabajando y su capacidad total es utilizada en pequeños lapsos. Distintos estudios indican que, como media, se emplea nada más que el 50-70% de la capacidad máxima. En un compresor estándar esto significa un cambio permanente entre el funcionamiento en carga y en vacío, y por consiguiente, un gran desperdicio de energía, ya que el compresor queda encendido y consumiendo energía cuando funciona en vacío. Con la automatización del sistema de aire comprimido se comprobó que por lo menos se tiene un ahorro del 27 por ciento en energía eléctrica.
4. El valor o costo monetario de la energía deberá seguir un proceso y una forma de cobro con base en los precios establecidos en las leyes que regulan dicho servicio entre las empresas de electricidad y la Comisión

Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) y las autoridades del país, regidas con base en los reglamentos de las anteriores entidades. Para conocer el costo de la energía que se consume se debe tomar en cuenta la capacidad del motor en Kw, que será la energía que consume el motor, según el tiempo que esté en funcionamiento, la potencia máxima y la potencia contratada, estos datos se multiplican por sus cargos correspondientes (cargo unitario por energía Q/kwh, cargo unitario por potencia máxima Q/kw-mes, cargo unitario de potencia contratada Q/kw-mes, respectivamente), estos cargos son puestos en la facturación mensual.

5. Para la automatización se tiene como alternativas las siguientes: Utilizar como variable de control el caudal del sistema o la presión en el tanque de almacenamiento. De estas alternativas se escoge como variable de control a la presión, para realizar un sistema de control continuo de lazo cerrado del tipo proporcional integral (PI), con este sistema y un variador de velocidad se logra suministrar la cantidad de aire inmediatamente requerida a la utilización, dentro de los límites de velocidad programados. De esa manera el consumo de energía se vuelve directamente proporcional a la utilización del aire comprimido.

6. Con el estudio realizado se obtuvieron cálculos del costo en energía que significa el funcionamiento de un compresor de 50 Hp. Los datos obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Gasto de energía anual		Ahorro del 27% en quetzales
Sin automatización	Con automatización	
452,284.5816	331,675.3598	120,609.222
Gasto de potencia		
182,130.772	132,955.4636	49,175.3084
TOTAL AHORRO EN QUETZALES		169,784.53

Fuente: elaboración propia. Año 2010.

Se obtiene un ahorro de Q.169,784.53, que comparados con la inversión necesaria para la automatización resulta conveniente y beneficiosa. Con esto se comprueba que, sí se obtiene un ahorro de energía y potencia, por lo que podemos comprobar que el proyecto es totalmente rentable.

RECOMENDACIONES

1. Tomar las medidas necesarias de seguridad inspeccionando todas las instalaciones frecuentemente, procurando que no existan fugas de aire, ya que estas representan también un peligro para el personal y un gasto en energía eléctrica para la planta.
2. Para un eficiente control de la presión se debe tener inmerso en el proceso un sensor o transductor bastante preciso, que tome la lectura rápidamente y la transmita al sistema implementado.
3. Se debe tener en cuenta que para tener un mayor ahorro, la planta debe contar con compresores de tornillo.
4. En las futuras ampliaciones, o si se necesita más producción de aire, es importante que se tome en cuenta la automatización del nuevo sistema, y que se incluyan los gastos en el nuevo presupuesto. De esta manera el compresor se acoplará a las nuevas necesidades sin exceder la capacidad del equipo a instalar, esto representará ahorro económico.
5. Al observar lo detallado en la factura de cobro, se conoce la tarifa a la que se está inscrito y lo caro que de la energía eléctrica, con esta observación se estará pendiente de que el cobro mensual no se salga del presupuesto de la empresa y motivará a la empresa a buscar alternativas de ahorro.

6. Es importante que el personal esté familiarizado con los nuevos cambios de la planta, por lo que es conveniente que se capacite a los operadores para obtener un excelente funcionamiento de la planta, y conocimiento en el sistema para solucionar rápidamente los problemas que se presenten.
7. Una vez implementada la automatización en un sector de la planta, o con un compresor, es importante monitorear su funcionamiento, y con base en estos datos realizar mejoras al mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Allen Bradley, Digital I/O Modules, Publicación 1746-IN005B-EN-P, Estados Unidos, 2002, 75 pp.
2. Allen-Bradley, Adjustable Frequency AC Drive Reference Manual, Publicación PFLEX-RM001C-EN-E, Milwaukee, E.U, Diciembre 2001.
3. Allen-Bradley, Bulletin 1761-6.3ES, MicroLogix™ 1000 Programmable Controllers™ 1000, Users Manual, Publicación 1761-6.3, Milwaukee, E.U, Diciembre 1995.
4. Chapman Stephen, **Máquinas eléctricas**, 3ª ed., MacGraw Hill, Colombia, 2000.
5. Comisión Nacional de Energía Eléctrica, Normas técnicas del servicio de distribución, Guatemala: s.e. 1999.
6. Empresa Eléctrica de Guatemala. Normas para acometidas de servicio eléctrico, 12ª ed. Guatemala: s.e. 1998.
7. Enrique Carnicer, **Aire Comprimido teoría y cálculo de las instalaciones**. 1ª ed. Madrid: Editorial Paraninfo, S.A.1991. 292pp.
8. Hugdes, Thomas A., **Measument and Control Basics**, 3rd Edition, ISA The Instrumentation Systems and Automation Society, United States of America, 2002.
9. Sandoval Torres, Cinda Luz. Variador de velocidad para motores trifásicos CA.Tesis Ing. Elec. Chula, Puebla México: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica,