



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

**CONTROL PID ANTICIPADO DE LA TEMPERATURA EN LA REUTILIZACIÓN
DEL LUBRICANTE SOLUBLE, UTILIZADO EN LAS MÁQUINAS
FORMADORAS DE BOTES DE ALUMINIO POR GOLPE**

Israel Bernabé Chirix Cocón

Asesorado por el Ing. Marco Antonio Mendoza Leonardo

Guatemala, septiembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTROL PID ANTICIPADO DE LA TEMPERATURA EN LA REUTILIZACIÓN
DEL LUBRICANTE SOLUBLE, UTILIZADO EN LAS MÁQUINAS
FORMADORAS DE BOTES DE ALUMINIO POR GOLPE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ISRAEL BERNABÉ CHIRIX COCÓN

ASESORADO POR EL ING. MARCO ANTONIO MENDOZA LEONARDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Romeo Nefalí López Orosco
EXAMINADORA	Inga. María Magdalena Puente Romero
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**CONTROL PID ANTICIPADO DE LA TEMPERATURA EN LA REUTILIZACIÓN
DEL LUBRICANTE SOLUBLE, UTILIZADO EN LAS MÁQUINAS
FORMADORAS DE BOTES DE ALUMINIO POR GOLPE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 25 de noviembre de 2010.



Israel Bernabé Chikix Cocón

Guatemala, 13 de febrero de 2013.

Señor Coordinador de Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Reciba un cordial saludo.

Por este medio, me permito informarle que he revisado completamente el trabajo de graduación titulado **"CONTROL PID ANTICIPADO DE LA TEMPERATURA EN LA REUTILIZACIÓN DEL LUBRICANTE SOLUBLE, UTILIZADO EN LAS MÁQUINAS FORMADORAS DE BOTES DE ALUMINIO POR GOLPE"**, desarrollado por el señor Israel Bernabé Chirix Cocón, dicho trabajo cumple con los objetivos propuestos en el anteproyecto de tesis. Por lo tanto el autor de este trabajo y yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Sin otro particular me es grato suscribirme.

Atentamente



A handwritten signature in black ink, appearing to read "Mendoza", written over a horizontal line.

Ing. Marco Antonio Mendoza Leonardo
Asesor nombrado
Colegiado 5554



Ref. EIME 20. 2013.

Guatemala, 22 de FEBRERO 2013.

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:
"CONTROL PID ANTICIPADO DE LA TEMPERATURA EN LA
REUTILIZACIÓN DEL LUBRICANTE SOLUBLE, UTILIZADO EN
LAS MÁQUINAS FORMADORAS DE BOTES DE ALUMINIO POR
GOLPE", del estudiante Israel Bernabé Chirix Cocón que
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



STO



REF. EIME 20 2013.

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; ISRAEL BERNABÉ CHIRIX COCÓN titulado: “CONTROL PID ANTICIPADO DE LA TEMPERATURA EN LA REUTILIZACIÓN DEL LUBRICANTE SOLUBLE, UTILIZADO EN LAS MÁQUINAS FORMADORAS DE BOTES DE ALUMINIO POR GOLPE” procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

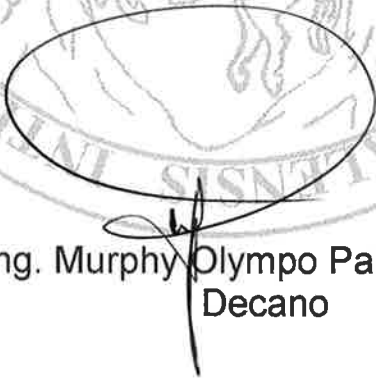


GUATEMALA, 30 DE ABRIL 2,013.



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: **CONTROL PID ANTICIPADO DE LA TEMPERATURA EN LA REUTILIZACIÓN DEL LUBRICANTE SOLUBLE, UTILIZADO EN LAS MÁQUINAS FORMADORAS DE BOTES DE ALUMINIO POR GOLPE**, presentado por el estudiante universitario: **Israel Bernabé Chirix Cocón**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, septiembre de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la vida, la oportunidad de conocer las ciencias y por guiarme en la comprensión de su inmensa creación.
- Mis padres** Catalina Cocón de Chirix y Octaviano Chirix, por su invaluable apoyo y ejemplo de superación.
- Mi esposa** Amelia Fuentes de Chirix. Por ser una importante fuente de apoyo y motivación en la conclusión de esta carrera.
- Mis hijos** Israel, Omar y Rosmary, por ser mi inspiración y razón de felicidad.
- Mis abuelos** Por su ejemplo de esfuerzo y dedicación, en especial a la memoria de Micaela Ajú (q.e.p.d.), ejemplo de coraje y superación.
- Mis tíos** Por todo su apoyo y admiración.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por darme la oportunidad de la realización
y conclusión de esta carrera.

Facultad de Ingeniería

Por todos los conocimientos obtenidos.

**Colgate Palmolive,
C.A.S.A.**

Por permitirme la realización de las
prácticas supervisadas.

Amigos de trabajo

Por su invaluable apoyo, en especial a Luis
Nuni, por los cambios de turno.

**Envases de Centro
América, S. A.**

Por su colaboración y apoyo en la
realización del trabajo de tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XXV
OBJETIVOS.....	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. PROYECTO	1
1.1. Antecedentes de Envases de Centroamérica.....	1
1.2. Descripción del tema	2
1.3. Producción.....	5
1.4. Área de acción.....	6
2. SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO	13
2.1. Intercambiadores de calor	13
2.1.1. Tipos de intercambiadores según su construcción.....	14
2.1.1.1. Intercambiadores de carcasa y tubo....	14
2.1.1.1.1. Componentes de los intercambiadores de carcasa y tubo	18
2.1.1.2. Intercambiador de calor de placas.....	21
2.1.1.2.1. Diseño de las placas	25
2.1.2. Tipos de intercambiadores de calor según su operación.....	28

2.1.2.1.	Flujo paralelo.....	29
2.1.2.2.	Contraflujo.....	30
2.1.2.3.	Flujo cruzado.....	31
2.1.2.4.	Intercambiadores de un solo paso (o paso simple) y de múltiples pasos.....	32
2.2.	Enfriadores (<i>chillers</i>)	33
2.2.1.	Tipos de enfriadores.....	34
2.2.1.1.	Enfriadores de compresión mecánica ..	35
2.2.1.1.1.	Compresor reciprocante	35
2.2.1.1.2.	Compresor centrífugo ...	36
2.2.1.1.3.	Compresor <i>Scroll</i>	39
2.2.1.1.4.	Compresor de tornillo	40
2.2.2.	Descripción de las partes del enfriador mecánico ...	43
2.2.2.1.	El compresor	45
2.2.2.2.	El evaporador	45
2.2.2.3.	El condensador	45
2.2.2.4.	La válvula termostática.....	46
2.2.2.5.	Dispositivos y controles	46
2.2.2.6.	Circuito de control	48
2.2.3.	Funcionamiento del <i>chiller</i> mecánico	48
2.2.3.1.	Ciclo de Carnot de un fluido condensable	50
3.	CONTROLES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLC)	53
3.1.	Características fundamentales.....	54
3.2.	Hardware.....	55
3.3.	Software	58
3.4.	Configura del rack para PLC RSLogix5000.....	61

3.4.1.	Configuración de un nuevo chasis para Logix5000	63
3.5.	Configuración de red Ethernet para Logix5000	73
3.6.	Interfaz hombre-máquina (HMI).....	78
3.6.1.	Tipos de terminales <i>PanelView Plus</i> (Allen-Branley)	82
3.6.1.1.	Terminales <i>PanelView Plus</i> 700 a 1500.....	83
3.6.1.2.	Componentes modulares.....	84
3.6.2.	Configuración de <i>PanelView Plus</i>	86
4.	VARIADORES DE FRECUENCIA.....	91
4.1.	Principio de operación	93
4.2.	Estructura del variador de frecuencia	95
4.2.1.	El módulo de control	95
4.2.2.	El módulo de potencia	97
4.2.3.	La variación de velocidad	97
4.2.4.	Modos de control	98
4.2.4.1.	El control escalar	99
4.2.4.2.	El control vectorial	99
4.2.5.	Interacción entre red y convertidor	101
4.2.5.1.	Componentes armónicos.....	101
4.2.5.2.	Reactancia de red / inductor en el <i>link</i> DC	102
4.3.	Programación del variador de frecuencia	104
4.3.1.	Parámetros de placa motor	107
4.3.2.	Parámetros de velocidad	108
5.	CONTROL PID.....	111

5.1.	Teoría de control	111
5.1.1.	Variables controladas	113
5.1.2.	Variables manipuladas	113
5.1.3.	Variables de carga	114
5.2.	El problema del control.....	114
5.3.	Variable de proceso	115
5.4.	Set <i>point</i> (SP) de proceso	116
5.5.	Error de proceso	116
5.6.	Control <i>on/off</i>	117
5.7.	Control <i>on/off</i> con histéresis.....	118
5.8.	PWM	118
5.8.1.	Tiempo de ciclo y PWM.....	119
5.9.	Control proporcional	121
5.9.1.	Error estacionario	124
5.9.1.1.	Reducción del error estacionario.....	125
5.10.	Control proporcional derivativo PD.....	125
5.11.	Control proporcional integral PI	128
5.12.	Control proporcional integral derivativo PID	132
5.12.1.	Banda proporcional	133
5.12.2.	Constante de tiempo integral.....	134
5.12.3.	Constante de tiempo derivativa	135
5.12.4.	<i>Offset</i> de salida del controlador	135
5.13.	Implementación del controlador PID	136
5.14.	Sintonización de un PID	138
5.14.1.	Método de las oscilaciones de lazo cerrado.....	139
5.14.2.	Método de la respuesta al escalón.....	141
5.15.	Control <i>feedforward</i> (control por adelanto).....	143
5.15.1.	Teoría de control <i>feedforward</i>	144
5.15.2.	Control anticipado en un intercambiador de calor .	146

5.15.3.	Reajuste por medio de <i>feedback</i>	148
6.	TERMOPARES	151
6.1.	Tipos de termopares.....	154
6.1.1.	Termopar tipo J.....	156
6.2.	Cables compensados según normas IEC y DIN.....	157
6.2.1.	Código de colores para cables compensados y de extensión	158
7.	MONTAJE MECÁNICO, HIDRÁULICO, ELÉCTRICO Y PROGRAMACIÓN DEL PID ANTICIPADO.....	161
7.1.	Especificaciones de la instalación mecánica/hidráulica.....	161
7.2.	Datos del intercambiador de calor	163
7.3.	Bombas centrifuga.....	164
7.3.1.	Válvula de bola	166
7.3.2.	Regulador/filtro para aire comprimido.....	168
7.3.3.	Funcionamiento del regulador/filtro para aire comprimido	168
7.3.4.	Presostato de seguridad.....	170
7.4.	Válvula proporcional I/P	171
7.4.1.	Funcionamiento válvula proporcional	172
7.5.	Sensor de presión	175
7.5.1.	Transductores magnéticos de inductancia variable	175
7.5.2.	Transductores magnéticos de reluctancia variable	176
7.5.3.	Transductores capacitivos	177
7.5.4.	Sensores basados en celdas de esfuerzo	178
7.5.5.	Transductores piezoeléctricos	179

7.6.	Programación de las rutinas en e PLC.....	179
7.6.1.	Programación PID	180
7.6.2.	Alarma de falta agua helada.....	188
7.7.	Creación de pantallas HMI (<i>human machine interface</i>).....	189
7.8.	Calibración de la servoválvula y de las entrada análoga del PLC	194
7.9.	Instalación final proyecto.....	197
7.10.	Costos	201
CONCLUSIONES.....		203
RECOMENDACIONES		205
BIBLIOGRAFÍA.....		207

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Formado de copas aluminio	2
2.	Formado del cuerpo bote de aluminio	3
3.	Proceso de fabricación de botes de aluminio	4
4.	Estirado de la copa de aluminio	7
5.	Lubricación del punzón sobre la copa de aluminio.....	8
6.	Filtro Womack	9
7.	Alimentador de filtros.....	10
8.	Filtro Womack, vista frontal y superior	12
9.	Intercambiador de calor de carcasa y tubo	15
10.	Configuración de intercambiadores de calor de carcasa y tubo.....	17
11.	Partes de un intercambiador de calor de placas	22
12.	Dirección de los fluidos en el intercambiador de calor de placas	24
13.	Configuración de placas de los intercambiadores de calor	28
14.	Intercambiador de calor de flujo paralelo	29
15.	Intercambiador de calor contraflujo	30
16.	Intercambiador de calor de flujo cruzado	31
17.	Intercambiador de calor de un solo paso y múltiple paso.....	33
18.	Pistones del compresor recíprocante	36
19.	Partes principales de un compresor centrífugo.	38
20.	Operación de un compresor <i>scroll</i>	40
21.	Compresor de tornillo succionando gas	41
22.	Componentes básicos del compresor de tornillo.....	42
23.	Montaje y operación de un <i>chiller</i> mecánico	43

24.	Esquema básico de funcionamiento de un <i>chiller</i>	49
25.	Ciclo de Carnot de un fluido condensable	50
26.	Proceso controlado por un PLC.....	53
27.	Constitución modular de un autómata programable	56
28.	Diagrama del ciclo de <i>scan</i> para ejecución cíclica.....	60
29.	Chasis para Logix5000 de 4 <i>slots</i>	62
30.	Chasis de 10 <i>slots</i> para Logix5000	62
31.	Configuración de un nuevo proyecto	63
32.	Menú de configuración del chasis.....	63
33.	Controlador completamente configurado	65
34.	Software del Logix5000, ya configurado	65
35.	Para asignar una nueva tarjeta a un slot, click en <i>new module</i>	66
36.	Menú para agregar tarjetas de control	67
37.	Elección de tarjeta de control.....	67
38.	Configuración de la tarjeta de control	68
39.	Propiedades de la tarjeta análoga	69
40.	Configuración de la entrada análoga	70
41.	Vista del <i>rack</i> configurado.....	71
42.	Configuración del chasis de la máquina Womack.....	72
43.	Selección módulo de comunicación Ethernet	74
44.	Ventana principal de configuración del módulo de comunicación.....	75
45.	Configuración de la tarjeta de comunicación Ethernet.....	76
46.	Propiedades de la tarjeta de comunicación Ethernet.....	76
47.	Configuración terminada del chasis.....	77
48.	Interfaz HMI, mostrando información en tiempo real	79
49.	Identificación según el número de catálogo de una terminal <i>PanelView Plus</i>	83
50.	Componentes modulares de una terminal <i>PanelView Plus</i>	85
51.	Pantalla táctil	85

52.	<i>PanelView Plus</i> en una red Ethernet/IP	86
53.	Pantalla inicial de configuración	87
54.	Opciones de configuración de la terminal	88
55.	Configuración de red Ethernet/IP	89
56.	Asignación de la dirección IP y máscara de subred.....	90
57.	Diagrama par versus velocidad de un motor alimentado en directo.....	91
58.	Diagrama par versus velocidad de un motor alimentado por convertidor de frecuencia	93
59.	Esquema de principio de un convertidor de frecuencia.....	94
60.	Estructura general interna de un variador de velocidad.	95
61.	La modulación de ancho de pulso.....	98
62.	Formas de onda de tensión y corriente e la entrada del VFD	103
63.	Menú configuración inicial para hacer trabajar un motor con el VFD .	105
64.	Interfaz de programación de los VFD vía PC	106
65.	Interfaz humano-máquina de los variadores	106
66.	Sistema de control de proceso.....	111
67.	Variable manipulada, de carga y controlada en el proceso.....	112
68.	Gráfica control <i>on/off</i>	117
69.	Gráfica de la modulación PWM.....	120
70.	Control proporcional	123
71.	Comportamiento del controlador PID	137
72.	Oscilaciones de lazo cerrado	140
73.	Respuesta al escalón	142
74.	Control <i>feedforward</i>	144
75.	Ejemplo del control <i>feedforward</i>	145
76.	Compensación dinámica en control <i>feedforward</i>	147
77.	Control <i>feedback</i> y <i>feedforward</i> juntos	148
78.	Efecto Seebeck	151
79.	Deferencia potencial en la unión fría	152

80.	Aspecto físico de un termopar	152
81.	Partes de una bomba centrífuga.....	166
82.	Partes de una llave de bola	167
83.	Elementos del regulador de presión de aire comprimido	169
84.	Construcción interna de un presostato	170
85.	Partes de una válvula proporcional.....	171
86.	Partes de un convertidor I/P	172
87.	Diagrama eléctrico del convertidor I/P	173
88.	Transductor magnético de inductancia variable.....	175
89.	Transductor magnético de reluctancia variable	176
90.	Transductor capacitivo	177
91.	Sensor a base de celdas de esfuerzo.....	178
92.	Esquema del control PID anticipado	179
93.	Configuración <i>rack</i> del PLC	181
94.	Propiedades de la tarjeta del <i>slot</i> 8.....	181
95.	Pestaña de configuración de la tarjeta.....	182
96.	Canal 3 del <i>slot</i> 9 que controla la servoválvula.....	183
97.	Rutina elegida para agregar control PID.....	183
98.	Para agregar una nueva línea de instrucción	184
99.	Menú de instrucciones especiales	184
100.	Instrucción especial PID, sin valores	185
101.	Selección de la variable de control	185
102.	Elección de la variable manipulada.....	186
103.	Parámetros del control PID.....	187
104.	Contactos para alarmas de falta de agua helada o fuera de temperatura de trabajo.....	188
105.	Configuración de comunicación del <i>FactoryTalk Studio</i>	189
106.	Despliegue de toda la red Ethernet de PLC.....	190
107.	Pantalla de supervisión del valor de presión a la entrada.....	191

108.	Listado de <i>tags</i> que pueden usarse en el HMI	192
109.	Pantalla de aviso de alarmas	192
110.	Creación del programa de pantallas.....	193
111.	Transferencia de programa de pantallas.....	194
112.	Calibrador de procesos Fluke 725	194
113.	Ajustando la servoválvula.....	195
114.	Tarjeta de salida análoga del banco de pruebas.....	196
115.	PLC Logix5555, utilizado para ajustes del PID anticipado	197
116.	Transmisor de presión, para censar la señal de presión del soluble..	198
117.	Servoválvula modulando el flujo de agua helada	199
118.	Instalación del <i>bypass</i> a la salida de las bombas del soluble.....	199
119.	Bombas que envía el soluble a las máquinas después de pasar por el intercambiador de calor	200
120.	Tarjetas de entradas y salidas análogas	201

TABLAS

I.	Comparación de las ventajas del uso de un VFD	92
II.	Parámetros de placa del motor	108
III.	Parámetros de velocidad.....	109
IV.	Parámetros de arranque del VFD.	110
V.	Porcentaje de potencia de salida	122
VI.	Control proporcional vs. proporcional derivativo	127
VII.	Valores de salida usando control PI.....	130
VIII.	Tipos de termopares	155
IX.	Tolerancias límites para cables compensados y de extensión según IEC 584-3	159
X.	Especificaciones técnicas del intercambiador de calor	163
XI.	Especificaciones técnicas del convertidor I/P utilizado.....	174

XII. Costos del proyecto202

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BTU	Cantidad de energía
Btu/lb	Capacidad de calor
Cu	Cobre, metal
d.p.p.	Diferencia de potencial, voltaje
°C	Grado Celsius, unidad termométrica
°F	Grado Fahrenheit, unidad termométrica
f	Frecuencia
GPM	Galones por minuto
Hz	Hercios
Fe	Hierro, metal
lb	Libra
m.c.a.	Metro de columna de agua. Presión ejercida por una columna de agua pura de un metro de altura.
μA	Microamperio, de corriente eléctrica
mV	Milésima parte del voltio, milivoltio
mA	Miliamperio, milésima parte del amperio unidad de corriente eléctrica
Ni	Níquel, metal
RPM	Revoluciones por minuto
psi	Unidad de presión por pulgada cuadrada

GLOSARIO

Ángulo de Chevron	Ángulo agudo.
Anisotropía	Es la propiedad general de la materia, según la cual cualidades como elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc., varían según la dirección en que son examinadas. (Acción opuesta a la isotropía).
ASIC	Es un circuito integrado hecho a la medida para un uso en particular.
<i>Body maker</i>	Máquina formadora del cuero de bote por impacto.
BTU	Representa la cantidad de energía que se requiere para elevar en un grado Fahrenheit, la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales.
<i>Bypass</i>	Se refiere, en general, a una derivación, desvío o corte de una ruta.
Calor específico	Es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico, para elevar su temperatura en una unidad (Kelvin o grado Celsius).

Carburo	Compuesto metálico que se forma a partir de la unión entre el carbono y un elemento E (generalmente más electropositivo que el carbono) para dar sustancias del tipo ExCy.
Cárter	Es una de las piezas fundamentales de una máquina, especialmente de un motor. Técnicamente, el cárter es una caja metálica que aloja los mecanismos operativos del motor.
Chiller	Un enfriador de agua, es un caso especial de máquina frigorífica, cuyo cometido es enfriar un medio líquido.
Coma flotante	Es una forma de notación científica usada en los CPU, GPU y FPU, que permite representar números reales extremadamente grandes y pequeños de una manera muy eficiente y compacta, y con la que se pueden realizar operaciones aritméticas.
Compact Flash	Fue originalmente un tipo de dispositivo de almacenamiento de datos, usado en dispositivos electrónicos portátiles.
Constantán	Es una aleación, generalmente formada por un 55% de cobre y un 45% de níquel (Cu55Ni45).
ControlNet	Es un protocolo de red abierto para aplicaciones de automatismos industriales; también es conocido como bus de campo.

Coralube 737	Lubricante sintético que se usa en la formación de botes por impacto.
Cupper	Máquina troqueladora de copas de aluminio.
Devicenet	Es un protocolo de comunicación usado en la industria de la automatización para interconectar dispositivos de control para intercambio de datos. Este usa bus CAN como tecnología <i>Backbone</i> y define una capa de aplicación para cubrir un rango de perfiles de dispositivos. Las aplicaciones típicas incluyen dispositivos de intercambio y de seguridad, y grandes redes de control con E/S.
DH+	La red Data Highway Plus (DH+) es una red de área local diseñada para admitir programación y mensajería remotas entre computadoras y controladores, para las aplicaciones de la planta.
DHCP	DHCP significa Protocolo de configuración de <i>host</i> dinámico. Es un protocolo que permite que un equipo conectado a una red pueda obtener su configuración (principalmente, su configuración de red) en forma dinámica (es decir, sin intervención particular).
DIN	Es el acrónimo de <i>Deutsches Institut Für Normung</i> (en español: Instituto alemán de normalización).

Dirección IP	Es una etiqueta numérica que identifica, de manera lógica y jerárquica, a un interfaz de un dispositivo (habitualmente una computadora) dentro de una red que utilice el protocolo IP (<i>Internet Protocol</i>), que corresponde al nivel de red del Modelo OSI.
Encoder	Es un codificador rotatorio, también llamado codificador del eje o generador de pulsos; suele ser un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor.
Entalpia	Es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H mayúscula, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico; es decir, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.
Especularidad	Un objeto es muy brillante si tiene una alta especularidad y mate si la tiene baja.
Estanqueidad	Se denomina junta mecánica, junta de estanqueidad o empaquetadura, a unos componentes de material adaptable que sirve para sellar bien la unión de las caras mecanizadas de los elementos de cierre de las cajas de transmisiones y genéricamente en cualquier elemento hidráulico y/o neumático, que llevan lubricante en su interior.

Ethernet	Es un estándar de redes de área local, para computadores con acceso al medio por contienda CSMA/CD (Acceso múltiple por detección de portadora con detección de colisiones), es una técnica usada en redes Ethernet para mejorar sus prestaciones.
Exhaust	Tubería de escape de gases.
FactoryTalk View Studio	Software para creación y edición de pantallas HMI de la casa AllenBrandley.
Firmware	Es un bloque de instrucciones de máquina para propósitos específicos, grabado en una memoria de tipo de solo lectura (ROM, EEPROM, flash, etc.), que establece la lógica de más bajo nivel, que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo.
Freón	Es un refrigerante compuesto por clorofluorocarbonos (CFC), productos dañinos para el ozono, dado el efecto de que al elevarse los CFC a la capa de ozono, lo descomponen.
GPM	Galones por minuto, capacidad de flujo de un sistema hidráulico.
Hidráulica	Es una rama de la física y la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos.

HMI	Interfaz de usuario por sus siglas en idioma inglés, (Human Machine Interface). Se usa para referirse a la interacción entre humanos y máquinas; aplicable a sistemas de automatización de procesos.
<i>Mer</i>	Extensión del archivo ejecutable en una terminal HMI de Allen-Brandley.
<i>Mother board</i>	La placa base, también conocida como placa madre o tarjeta madre (del inglés <i>motherboard</i> o <i>mainboard</i>) es una tarjeta de circuito impreso a la que se conectan los componentes que constituyen la computadora u ordenador.
Neumática	Es la tecnología que emplea el aire comprimido como modo de transmisión de la energía necesaria para mover y hacer funcionar mecanismos.
NTU	Es el método del número de unidades de transferencia (NUT); se usa para calcular la velocidad de transmisión de calor en intercambiadores de calor.
Número de Reynolds	Es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte, para caracterizar el movimiento de un fluido.
<i>Offset</i>	En sistemas de control es un ajuste al valor de lectura que puede ser negativo o positivo.

Oleofílico	Los absorbentes industriales son utilizados para limpiar derrames de hidrocarburos (petróleo y sus derivados) y químicos, que pueden llegar a producir contaminación en el agua o sobre el suelo.
Pascal	Es la unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades. Se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 Newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado, normal a la misma.
PLC	Un controlador lógico programable, más conocido por sus siglas en inglés PLC (<i>Programmable logic controller</i>); es una computadora utilizada en la ingeniería de producción industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de las máquinas de la fábrica, en líneas de montaje o producción.
Presostato	Es conocido también como interruptor de presión. Es un aparato que cierra o abre un circuito eléctrico, dependiendo de la lectura de presión de un fluido.
Profibus	Es un estándar de comunicaciones para bus de campo. Deriva de las palabras PROcess Field BUS.
PSI	La libra-fuerza por pulgada cuadrada, más conocida como psi (del inglés <i>pounds per square inch</i>) es una unidad de presión en el sistema anglosajón de unidades.

PWM	La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, siglas en inglés de <i>pulse-width modulation</i>) de una señal o fuente de energía, es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.
Rack	Es un soporte metálico destinado a alojar equipamiento electrónico, informático y de comunicaciones.
Reluctancia	La reluctancia magnética de un material o circuito magnético es la resistencia que este posee al paso de un flujo magnético cuando es influenciado por un campo magnético.
Rodete	Es un tipo de rotor situado dentro de una tubería o un conducto y encargado de impulsar un fluido.
RPI	El <i>Requested Packet Interval</i> (RPI) especifica el periodo en que los datos se actualizan hasta y desde el módulo. Los intervalos RPI se configuran en milisegundos. El intervalo es de 0,2 ms a 750 ms, para este módulo en particular.
RSLogix5000	Software de programación, de PLC, de la casa AllenBrandley.

Salmuera	La salmuera es agua con una alta concentración de sal (NaCl) disuelta.
Slot	Es un elemento de la placa base de un computador que permite conectar a esta una tarjeta adicional o de expansión.
Soluble	Lubricante compuesto de agua y aceite sintético.
Stand by	Estado en que la máquina queda en espera, es decir sin movimientos a la espera de la orden de trabajar.
Tag	En programación del RSLogix5000, es el nombre con que se hace referencia a un bit de entrada o una variable de memoria, el cual puede ser un valor real, entero o de bit.
Task	En programación RSLogix5000, es una rutina de programación.
Tobera	Conducto apropiadamente perfilado para que el fluido que por él circule, aumente su velocidad (con pérdida de presión) o su presión (con pérdida de velocidad).
Tramp oil	Aceite o grasa, contaminado con filos de metal proveniente de las <i>body makers</i> .
Transiente	Variación de tensión de alimentación picos de voltaje, en apenas unos pocas millonésimas de segundos.

Troquelación	Es el proceso mecánico para realizar agujeros en chapas de metal, láminas de plástico ó papel.
<i>Tuning</i>	Es un vocablo anglosajón que significa modificación o ajuste.
Turbina	Es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas.
VFD	Un variador de frecuencia (siglas VFD, del inglés: <i>Variable Frequency Drive</i> o bien <i>AFD Adjustable Frequency Drive</i>) 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.
WindowsCE	Windows CE (conocido oficialmente como <i>Windows Embedded Compact</i> y anteriormente como <i>Windows Embedded CE,1</i> , también abreviado como WinCE) es un sistema operativo desarrollado por Microsoft para sistemas embebidos.

RESUMEN

Sin ser percibidos, la mayoría de aparatos eléctricos de los que se hace uso cuentan con un sistema de control que puede ser un sistema básico hasta de los más complejos. A manera de ejemplo el control de una cafetera que básicamente es un control *on/off*, para mencionar alguno.

En la industria el panorama se amplía grandemente, desde el control de un pequeño horno, el que tendrá un controlador con el cual se puede interactuar de una forma más completa, este controlador por sencillo que sea, tendrá una pantalla para poder visualizar el valor de la temperatura deseada. Tendrá al menos un teclado, que mediante una combinación de teclas se puede ajustar el valor de temperatura a mantener constante.

Se puede mencionar el control de producción en línea, donde todas las máquinas están comunicadas a través de una red Ethernet. Al inicio del proceso existen varias máquinas que alimentan a las demás, para terminar todo el proceso en el área de empaque. La velocidad de las máquinas es modulada en función de demanda y existencia del producto.

Lo ideal es mantener constante la velocidad de producción, pero si por alguna razón al final del proceso falla una de las máquinas automáticamente al inicio del proceso disminuye la velocidad de las máquinas o de ser necesario pondrá en espera una o más hasta que se restablezca la máquina en falla. El software modula la velocidad de todo el proceso al recibir retroalimentación bidireccional, es decir la velocidad depende de la cantidad de máquinas disponibles al inicio y al final.

De la misma forma se modula la velocidad de transporte en función del estado de las máquinas y la capacidad de estos. Resumiendo esto es un sistema de control realimentado, gobernado a través de software, que puede ser modificado según la necesidad de producción.

Ahora bien, individualmente en las máquinas existen procesos que son controlados de forma precisa para proporcionar un producto de calidad a la siguiente máquina. Proceso que puede ser gobernado por un controlador especial o directamente por el PLC. En el desarrollo de los procesos de control, involucran varias ramas técnicas de ingeniería, por ejemplo el control de una bomba hidráulica, involucra hidráulica, mecánica y electrónica.

Resultando entonces, necesario tener una amplia experiencia en estas ramas técnicas para encontrar los resultados esperados.

A partir de esto se podrá tener la visión de implementar un proceso de control adecuado en una máquina, para mejorar la calidad del producto o reducir costos de producción.

OBJETIVOS

General

Mantener constante la temperatura del soluble que se requiera, mediante la implementación del control PID anticipado en la reutilización del soluble.

Específicos

1. Analizar los recursos con que se cuenta para poder implementar el control PID en la máquina filtro “Womack”.
2. Realizar las pruebas y ajustes necesarios con la servoválvula antes de ser instalada directamente en el proceso.
3. Probar todas las formas de control que se puede realizar con la servoválvula, antes de implementar el control PID completo, de esto ver las ventajas de uno sobre otro.
4. Hacer los ajustes necesarios, en las tarjetas de entrada y salida análogas del PLC de los obtenidos en las pruebas.
5. Agregar la rutina de control PID en el programa principal del PLC.
6. Desarrollar las pantallas de supervisión en la terminal HMI de la máquina.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación, el primer capítulo se da una visión general de los procesos en la fabricación de botes de aluminio, el cual implica procesos mecánicos y químicos principalmente. El capítulo dos, trata sobre los diferentes sistemas de enfriamiento y de transferencia de calor usados en la industria. La configuración y programación de un PLC de la marca Allen-Brandley, es tratada en el capítulo tres y el capítulo cuatro se incluye la programación de los variadores de frecuencia, de la misma marca.

Anteriormente el controlador de temperatura del soluble utilizado en las máquinas formadores de bote, era un sistema *on/off* el cual no es preciso, con el resultado de que cuando la temperatura superaba los cincuenta grados Celsius, para el operador de estas máquinas era muy incómodo hacer ajustes con el riesgo de sufrir quemaduras. Los diferentes sistemas de control se analizan en el capítulo cinco.

En pruebas realizadas por ellos y sin afectar el proceso se concluyó que la temperatura ideal es de 45°C, agradable para el operador y sin afectar al formado del botes. Para lograr esto se implementó un control PID anticipado, para mantener el control preciso de la temperatura del soluble.

Analizando los recursos que habían en su momento y de la capacidad y económica de la empresa de invertir en el equipo especializado, hállese del intercambiador de calor, la servoválvula, sensores y la contratación de contratistas para realizar la instalación mecánica.

En el capítulo siete se dan los detalles del montaje electromecánico que se realizó con todas las bases de los capítulos anteriores. Afortunadamente la empresa cuenta con un banco de pruebas donde se contó con un PLC completo con tarjetas de entrada y salida análogas, fuente de aire comprimido y un instrumento de calibración de procesos un Fluke 725, que fue de suma importancia para simular señales de sensores.

En el banco de pruebas se simularon todas las condiciones hasta encontrar los resultados deseados. Con estos resultados fueron trasladados a la máquina para evitar cometer errores y paros innecesarios en la línea de producción.

Ya instalado todo el equipo, se agregó la rutina de control PID en el programa principal del PLC; se hacen pruebas mínimas, logrando sintonizar el proceso en poco tiempo. Después se prueban las pantallas de supervisión en la terminal HMI de la máquina.

1. PROYECTO

1.1. Antecedentes de Envases de Centroamérica

Envases de Centroamérica (ECA) es el resultado de una *Joint Venture* establecida entre dos líderes del mercado en la fabricación, distribución y venta de envases: REXAM Inc. y Envases Universales S.A. de C.V. Está ubicada en Amatitlán, Guatemala, desde donde se abastece el mercado de Centroamérica, Panamá, sur de México y el Caribe.

Se inicia la construcción de la planta a finales del 2005, arranca operaciones en diciembre de 2006, y desde entonces ha venido expandiendo en capacidad para abastecer toda la demanda del mercado regional.

El envase que se produce es primordialmente para bebidas carbonatadas como refrescos y cervezas, así como para bebidas presurizadas con nitrógeno líquido como los jugos y néctares.

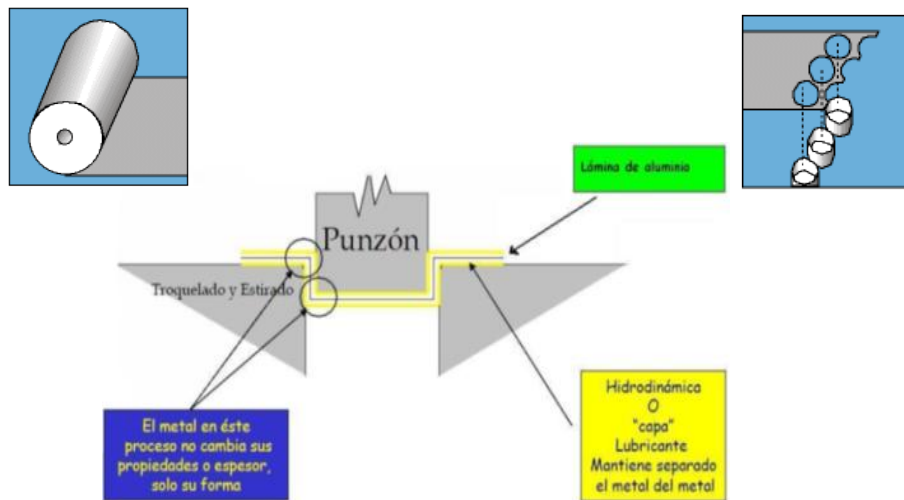
En resumen, Envases de Centroamérica (E.C.A.) es una empresa dedicada a la elaboración de latas de aluminio cumpliendo con altos estándares de calidad, tecnología y seguridad; satisfaciendo las necesidades del cliente, cuidando al equipo de trabajo, el medio ambiente y los intereses de los accionistas.

La visión principal de ECA es ser la mejor opción en envases de aluminio para la industria de bebidas.

1.2. Descripción del tema

Las etapas que se describen a continuación son una síntesis de los procesos que tienen lugar desde la materia prima hasta la lata terminada, lista para el envasado. La fabricación de botes de aluminio empieza con la troqueladora, llamada *Cupper*, máquina que es alimentada con una bobina de aluminio la cual al desenrollarse proporciona una lámina que previamente es lubricada. Al entrar esta lámina a la troqueladora por un golpe de 150 toneladas, forma 15 copas de aluminio (ver figura 1). El desperdicio derivado de esta fase se retira mediante aspiración y se compacta para su reciclado.

Figura 1. **Formado de copas aluminio**

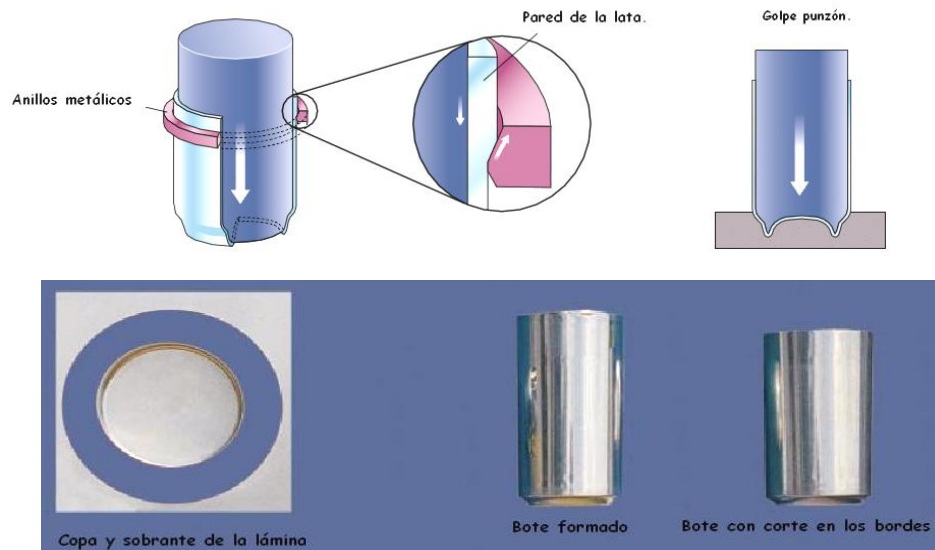


Fuente: MCKENZIE, Chris. Fluidos metalmecánicos y fabricación de latas. p.16.

Esta máquina tiene como velocidad máxima 240 golpes por minuto y es regulada según la demanda de botes que se hace a través del software de control de línea. Estas copas son transportadas y distribuidas a las máquinas formadoras de botes; actualmente hay 9 de estas máquinas.

Las máquinas formadoras de botes toman las copas y por el impacto de un punzón sobre la copa de aluminio; es estirada a través de una serie de anillos metálicos de carburo de tungsteno. En el proceso de estirado el espesor de las paredes de la copa disminuye, a la vez que va ganando altura y cambiando su forma a la de un cilindro, figura 2.

Figura 2. **Formado del cuerpo bote de aluminio**



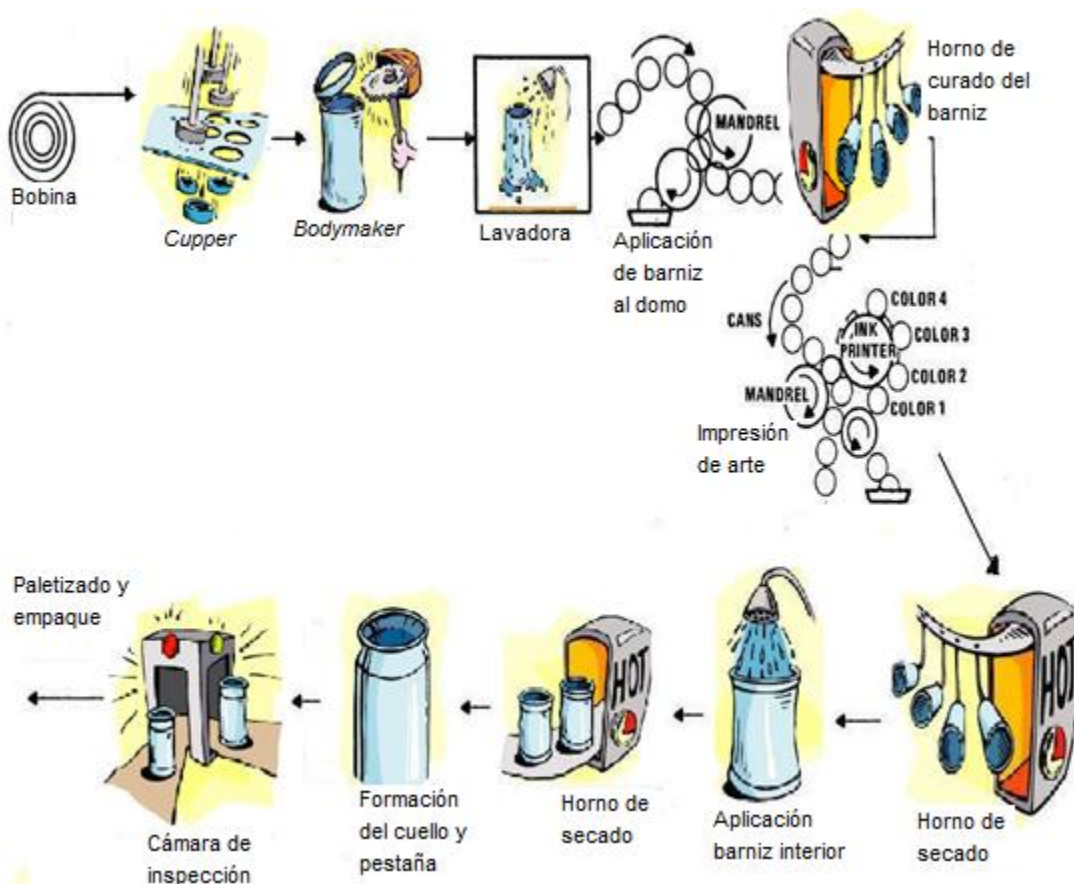
Fuente: <http://www.chymist.com/Aluminum%20can.pdf>. Consulta: agosto de 2011.

Al final de la serie de anillos metálicos hay un molde que le da forma de domo a la base del bote. El borde superior del bote es irregular, esto se debe a una característica de los metales llamada anisotropía, por la cual no se deforman exactamente lo mismo en cualquier dirección.

Al salir de la máquina, estos bordes son eliminados al recibir un corte que deja al bote a una altura según las especificaciones requeridas.

En el proceso de formación del cuerpo del bote hay varios parámetros que se toman en cuenta, tales como: velocidad, profundidad del golpe, presión neumática de desalajo, posición del punzón, presión hidráulica del soluble y lo que interesa para el presente estudio: la temperatura del soluble. Se propone como proyecto de mejora implementar un control PID anticipado sobre la temperatura del lubricante, para tener un control preciso de este parámetro. En la figura 3, se ve el proceso general de fabricación de botes de aluminio.

Figura 3. **Proceso de fabricación de botes de aluminio**



Fuente: <http://www.docstoc.com/docs/71693028/beverage-manufacturing-processes---1-manufacturing-processes>. Consulta: agosto de 2011.

Actualmente, debido a que es un control *on/off*, tiende a ser inestable y tiene cambios bruscos que afectan cuando sobrepasa los 50°C haciendo incómodo al operador hacer ajustes mecánicos y acorta la vida del punzón, aumentando los costos al tener que cambiar más temprano la herramienta formadora de botes, y comprometiendo la seguridad del operador, al exponerse a quemaduras. Otro factor crítico es que la variación en la temperatura del soluble causa variaciones de espesor en la pared de los botes.

1.3. Producción

Actualmente la máquina *cupper* tiene una velocidad máxima de 3 600 copas por minuto. Esta velocidad es regulada según la demanda de botes que es exigida por la disponibilidad de las máquinas formadoras de botes (*bodymakers*). Las *bodymakers* trabajan en un rango de 350 a 400 botes por minuto. Cuando están trabajando las 9 máquinas se consume la totalidad de copas producidas por la *cupper*, para evitar esto existe una mesa de acumulación de copas para que mantenga por lo menos 1 800 copas en reserva.

La velocidad de las *bodymakers* es controlada por la demanda de botes que exigen las impresoras y se comunican a través de una red Ethernet, por lo que el proceso está totalmente automatizado. Al decir automatizado se hace referencia a que los transportes (*conveyors*) y velocidad de las máquinas, están moduladas para proporcionar una alimentación constante de botes a las impresoras.

Al igual que para las *bodymakers* para impresoras, hay una mesa de acumulación para mantener constante la alimentación de botes.

Sea el caso en que una de las dos impresoras entra en falla, automáticamente las *bodymakers* bajan de velocidad, dependiendo de la cantidad de botes acumulados en la mesa y la que existe en transporte, algunas pasarán a espera y las demás seguirán trabajando en velocidad baja.

Si una de las que están trabajando a velocidad baja falla, empieza a trabajar una de las que estaba en espera todo para mantener constante la alimentación de botes, y cuando ya no haya espacio para más botes, es decir que el transporte está lleno, todas las *bodymakers* entran a estado de espera; lo mismo se aplica a la *cupper*.

Esto se logra debido a que todos los PLC de las máquinas están comunicados por una red Ethernet, y los transportes se comunican a través de una red DeviceNet.

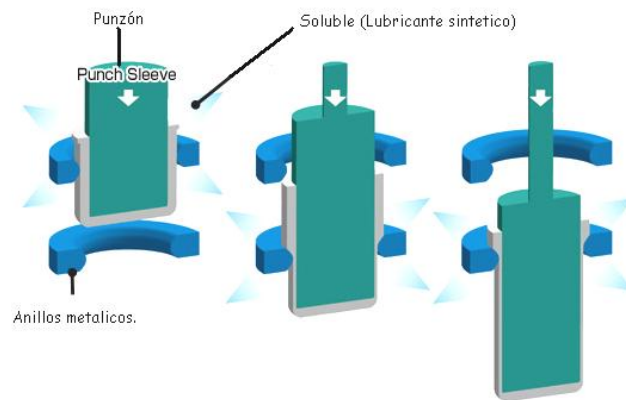
El caso ideal es mantener constante la línea de producción a una velocidad de 3 000 botes por minuto.

1.4. Área de acción

Lo que hacen las máquinas formadoras de botes o *bodymakers*, es un proceso de reembutido, donde la copa obtenida de la *cupper* es forzada por el punzón a través de anillos de precisión cada vez más pequeños, teniendo como resultado el adelgazamiento de la pared de la lata hasta obtener el diámetro interior y espesor de pared deseado, para posteriormente aumentar su longitud mediante varias etapas de planchado continuo.

Lo anteriormente descrito se puede apreciar en la figura 4.

Figura 4. **Estirado de la copa de aluminio**



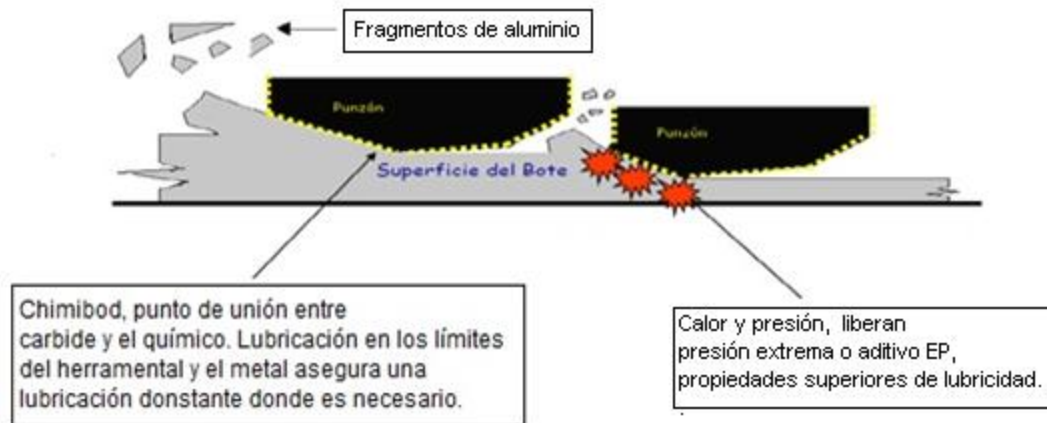
Fuente: http://www.toyo-seikan.co.jp/e/technique/img/imgadi_can.jpg. Consulta: agosto de 2011.

El proceso de planchado es más severo que el proceso de estirado y presenta una generación de calor considerable. Por lo tanto, es necesario inundar el formador de cuerpo con una emulsión lubricante de aceite con agua para remover el calor y proporcionar la lubricación necesaria en la interface de contacto.

Las emulsiones aceite con agua son esencialmente una mezcla bifásica heterogénea de aceite y agua. En esta planta en particular se usa el Coralube 737 como lubricante sintético, para todas las *bodymakers*. Su composición de lubricante (figura 5), provee reducción del desgaste de la herramienta (punzón y anillos) aumenta la specularidad (bote brillante) de la lata y su alta formulación de detergente de gran ayuda para la posterior limpieza del bote.

Los inhibidores especiales ayudan a reducir la corrosión ferrosa y de cobalto. El lubricante usado en las *bodymakers*, que de ahora en adelante se llamará simplemente soluble, es almacenado en un tanque subterráneo.

Figura 5. **Lubricación del punzón sobre la copa de aluminio**



Fuente: MCKENZIE, Chris. Fluidos metalmeccánicos y fabricación de latas. p. 21.

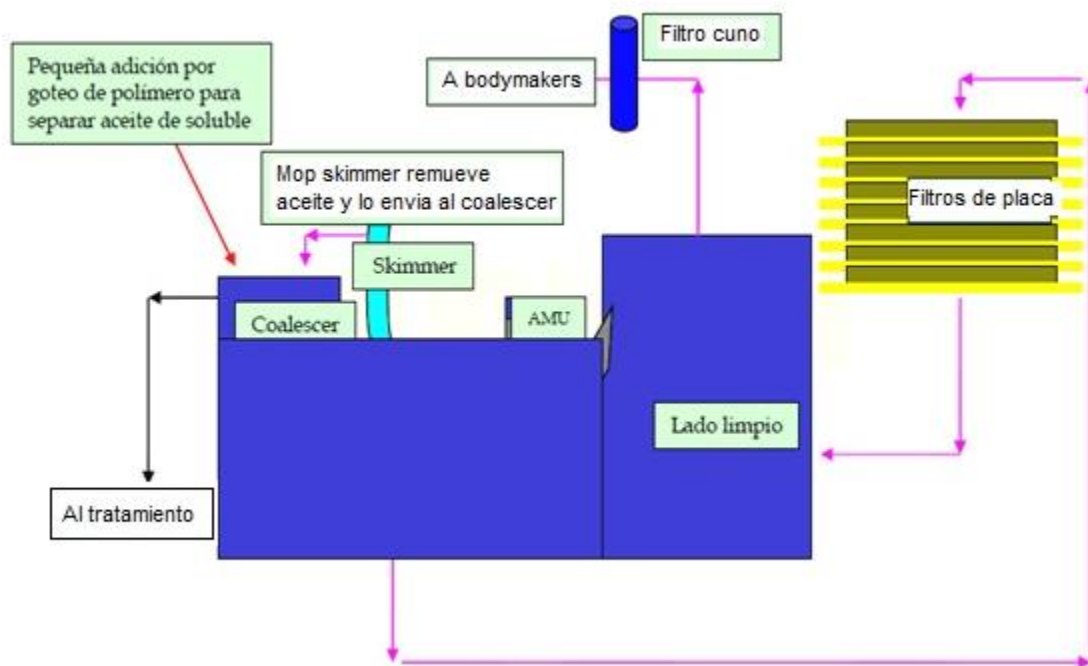
De este tanque es bombeado a la máquina de filtración conocida como filtro Womack (figura 6), el cual posee dos depósitos: uno llamado depósito de soluble sin filtrar y el otro depósito de soluble filtrado, con capacidad de 2 000 galones y 600 galones, respectivamente.

Del depósito subterráneo pasa directamente al tanque de soluble sin filtrar, permaneciendo bastante tiempo para permitir que los contaminantes pesados caigan al fondo y los de *tramp oil* salgan a la superficie. Dado que el aluminio es oleofílico “atracción por el aceite” hace más fácil retirar los pequeños fragmentos de aluminio que se desprenden a la hora de formar el cuerpo del bote.

Estos fragmentos de aluminio son retirados por un removedor tipo plumero que recoge estos contaminantes, los cuales pueden ser filos de metal y lodos.

Esta máquina posee 3 bombas, una para bombear el soluble contaminado P1, y otra para el soluble filtrado hacia las *bodymakers* P2, y una tercera P3 que puede ser usada para las dos anteriores en caso de falla o mantenimiento que necesite cualquiera de las dos anteriores.

Figura 6. Filtro Womack



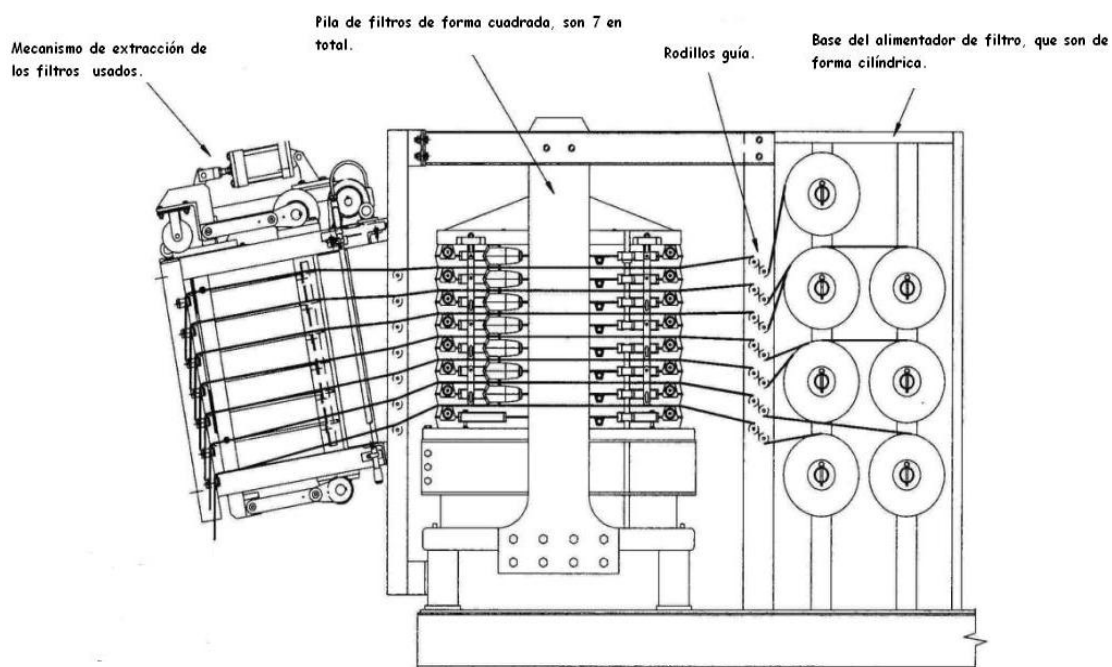
Fuente: MCKENZIE, Chris. Fluidos metalmecánicos y fabricación de latas. p. 77.

Por lo general la tercera bomba permanece como reserva, o en *standby*, como se dice técnicamente.

La bomba P1 es la de filtrado, su trabajo es bombear el soluble contaminado a través de una canasta de malla hacia los filtros. La razón de flujo de soluble a los filtros es controlada mediante un variador de frecuencia que controla la bomba P1.

En la figura 7 se pueden ver los filtros que consisten en una pila de 7 filtros planos cuadrados llamados platos, por donde el soluble es bombeado a presión, y cada vez que estos acumulan más suciedad, la presión sube hasta un máximo de 30 PSI (2.1kg/cm²).

Figura 7. Alimentador de filtros



Fuente: Envases de Centro América, S. A.

Cuando se da esta condición un *switch* de presión manda la señal al PLC, lo que permite a la máquina entrar en el ciclo de limpieza o cambio de filtros. En este estado, el soluble es desviado automáticamente a un filtro cilíndrico, mientras la máquina hace el cambio de filtros. En el cambio de filtros los platos se abren y un rodillo accionado por un motor hala el filtro sucio hasta ser totalmente reemplazados por filtros limpios; los filtros vienen en rollos, para facilitar su cambio.

El depósito de soluble sin filtrar debe de mantener un nivel casi constante, pero por evaporación y pequeñas fugas baja su nivel.

Para mantener el nivel constante se le adiciona agua desmineralizada y aditivos como el coralube 737, que no es más que el lubricante sintético; todo esto de forma automática, según lo requiera el proceso, para mantener un nivel constante.

El soluble, al salir de los filtros, es depositado en el tanque de soluble filtrado, listo para ser enviado a las *bodymakers* y cerrar el ciclo.

En este tanque hay un calefactor que mantiene el soluble sobre los 60°C, para evitar el crecimiento y proliferación de bacterias.

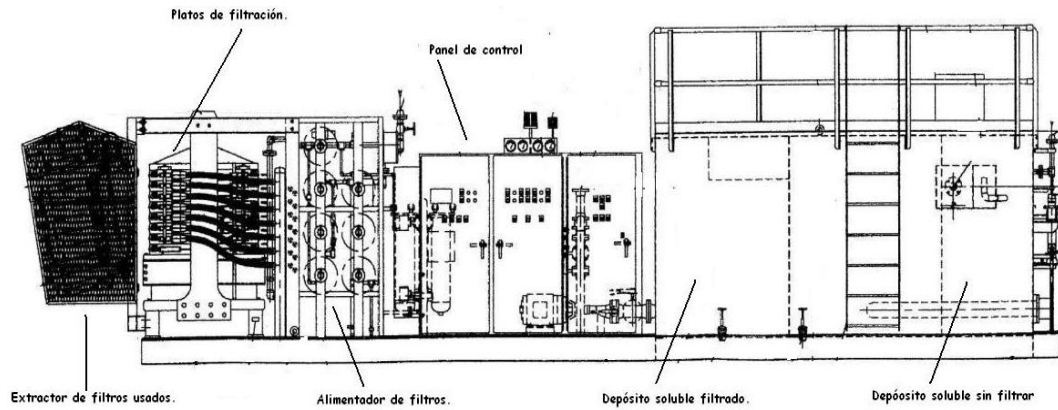
Ahora lo que interesa para este trabajo es la bomba P2 que es la encargada de bombear el soluble limpio hacia las *bodymakers*.

A la salida de P2, se instalará un intercambiador de calor y una llave servocontrolada, la cual regulará la cantidad de agua del *chiller*, para mantener la temperatura de soluble hacia las *bodymakers* en 45°C.

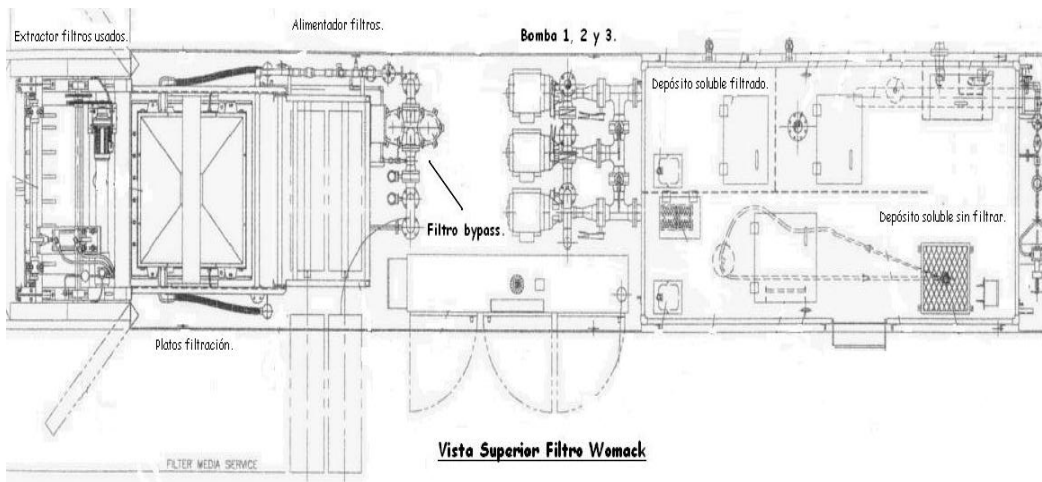
Esto se hará mediante el control de un proceso PID anticipado a través del PLC, un Logix5000.

Se tendrá como variable de proceso la presión del soluble que será censada por un sensor de presión, y como variable manipulada la llave del *chiller*, la cual regulará la entrada de agua helada para mantener la temperatura final del soluble hacia las *bodymakers* constante. En la figura 8 se muestra el filtro Womack en vista frontal y superior.

Figura 8. Filtro Womack, vista frontal y superior



Vista Frontal Filtro Womack



Vista Superior Filtro Womack

Fuente: Envases de Centro América, S. A.

2. SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

2.1. Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos medios que estén separados por una barrera o que se encuentren en contacto. Son parte esencial de los dispositivos de refrigeración, sistemas mecánicos, nucleares, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico, o bien de un fluido a otro.

Un entendimiento básico de los componentes mecánicos de los intercambiadores de calor es necesario para comprender cómo estos funcionan y operan para un adecuado desempeño. Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante uno con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante otro con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante uno con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido, mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura.

Debe quedar claro que la función de los intercambiadores de calor es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes.

Se debe tener en mente que el calor solo se transfiere en una dirección, del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura.

En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura, al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan.

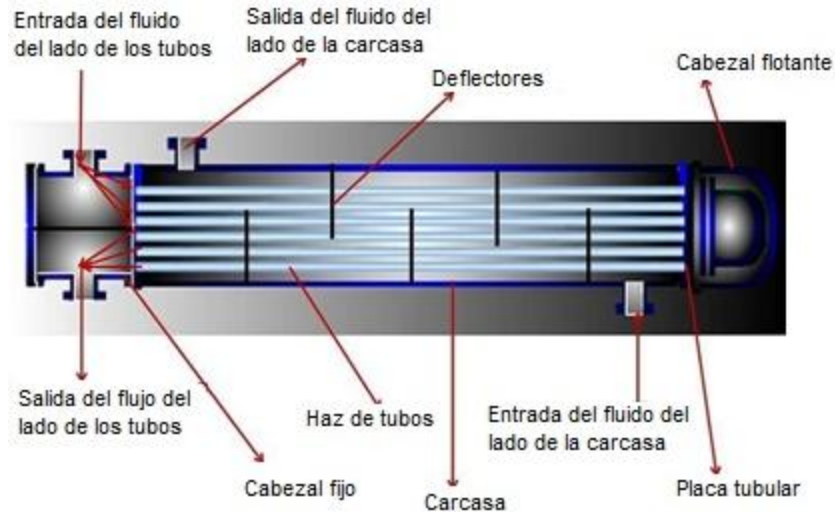
2.1.1. Tipos de intercambiadores según su construcción

Si bien los intercambiadores de calor se presentan en una inimaginable variedad de formas y tamaños, la construcción de los intercambiadores está incluida en alguna de las dos siguientes categorías: carcasa y tubo o placas. Como en cualquier dispositivo mecánico, cada uno de estos presenta ventajas o desventajas en su aplicación.

2.1.1.1. Intercambiadores de carcasa y tubo

La construcción más básica y común de los intercambiadores de calor es el de tipo tubo y carcasa que se muestra en la figura 9.

Figura 9. **Intercambiador de calor de carcasa y tubo**



Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esquema_intercambiador_de_calor.jpg.
Consulta: agosto de 2011.

Este tipo de intercambiador consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcasa. Al flujo dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo interno y aquel que fluye en el interior del contenedor, fluido de carcasa o externo. En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del externo de la carcasa por la(s) placa(s) del tubo. Los tubos se sujetan o sueldan a una placa para proporcionar un sello adecuado.

En sistemas donde los dos fluidos presentan una gran diferencia entre sus presiones, el líquido con mayor presión se hace circular típicamente a través de los tubos y el líquido; luego, con una presión más baja se circula del lado de la carcasa. Debido a los costos en materiales, los tubos del intercambiador de calor se pueden fabricar para soportar presiones más altas que la carcasa del cambiador, con un costo mucho más bajo.

Las placas de soporte (*support plates*) mostradas en la figura 9, también actúan como *baffles* para dirigir el flujo del líquido dentro de la carcasa hacia adelante y hacia atrás a través de los tubos.

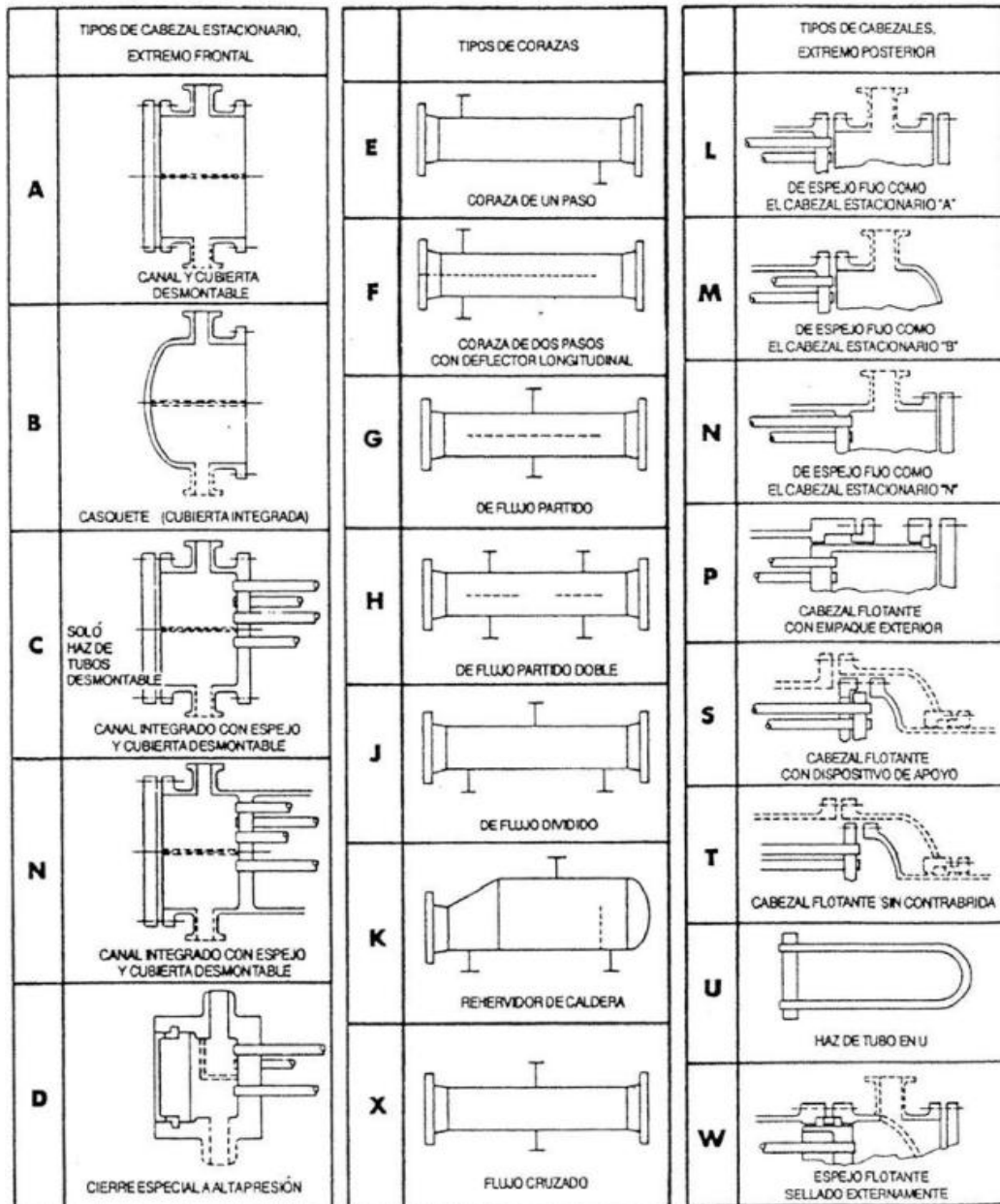
Se usa una amplia variedad de configuraciones en los intercambiadores de calor de carcasa y tubos, dependiendo del desempeño deseado de transferencia de calor y caída de presión y los métodos empleados para reducir los esfuerzos térmicos, prevenir fugas, fácil mantenimiento, soportar las presiones y temperaturas de operación, y la corrosión. Existe una nomenclatura para designar los tipos básicos de intercambiadores de calor de carcasa y tubos.

En este sistema, cada intercambiador se designa con tres letras, la primera indicando el cabezal delantero, la segunda el tipo de carcasa, y la tercera el cabezal posterior. También se ha conformado una serie de normas mecánicas para la construcción, fabricación, y materiales constructivos de tres tipos de intercambiadores de calor tubulares: R, C, B.

Los intercambiadores clase R son los usados en condiciones de operación severas, en procesos petroleros y afines. La clase C designa a los intercambiadores usados en aplicaciones comerciales y procesos generales bajo condiciones moderadas. La clase B designa a los intercambiadores de calor de carcasa y tubos usados en procesos químicos.

Generalmente, en estos últimos, los materiales constructivos son no ferrosos, mientras que en los de las clases C y R, se usan materiales ferrosos. Los tipos más frecuente de intercambiador son: AES, AEP, CFU, AKT, Y AJW. En la figura 10 se pueden ver las diferentes configuraciones de los intercambiadores de calor.

Figura 10. Configuración intercambiadores de calor de carcasa y tubo



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Configuracion_de_intercambiadores_TEMA.jpg.

Consulta: septiembre de 2011.

2.1.1.1.1. Componentes de los intercambiadores de carcasa y tubo

- Tubos: son los componentes fundamentales, que proporcionan la superficie de transferencia de calor entre el fluido que circula por el interior de los tubos y la carcasa.
 - Los tubos pueden ser completos o soldados y generalmente están hechos de cobre o aleaciones de acero.
 - Otras aleaciones de níquel, titanio o aluminio pueden ser requeridas para aplicaciones específicas.
 - Los tubos pueden ser desnudos o aleteados.
 - Los tubos doblemente aleteados pueden mejorar aún más la eficiencia.
 - A mayores velocidades, aumentan los coeficientes de transferencia de calor, pero también las pérdidas por fricción y la erosión en los materiales.
- Placa tubular: es generalmente una placa de metal sencilla que ha sido taladrada para albergar a los tubos (en el patrón deseado), las empacaduras y los pernos.

- Los tubos se mantienen en su lugar al ser insertados dentro de agujeros en la placa tubular, fijándose mediante expansión o soldadura.
- El espacio entre las placas tubulares debe estar abierto a la atmósfera, para que cualquier fuga pueda ser detectada con rapidez.
- Para aplicaciones más peligrosas puede usarse una placa tubular triple, sellos gaseosos e incluso un sistema de recirculación de las fugas.
- La placa tubular además de sus requerimientos mecánicos debe ser capaz de soportar el ataque corrosivo de ambos fluidos del intercambiador y ser compatible electroquímicamente con el material de los tubos.
- Deflectores: existen dos tipos de deflectores, transversales y longitudinales.
 - El propósito de los deflectores longitudinales es controlar la dirección general del flujo del lado de la carcasa.
 - Por ejemplo, las carcasas tipo F, G y H tienen deflectores longitudinales.
 - Los deflectores transversales tienen dos funciones, la más importante es la de mantener a los tubos en la posición adecuada

durante la operación y evita la vibración producida por los vórtices inducidos por el flujo.

- En segundo lugar ellos guían al fluido del lado de la carcasa para acercarse en lo posible a las características del flujo cruzado.
- El tipo de reflector más común es el simple segmentado.
- El segmento cortado debe ser inferior a la mitad del diámetro para asegurar que deflectores adyacentes se solapen en al menos una fila completa de tubos.
- Para flujos de líquidos en el lado de la carcasa el corte del deflector generalmente es del 20 a 25%; para flujos de gas a baja presión de 40 a 45%, con el objetivo de minimizar la caída de presión.
- Carcasa y boquillas del lado de la carcasa: la carcasa es el contenedor del segundo fluido, y las boquillas son los puertos de entrada y salida.
 - La carcasa generalmente es de sección circular y está hecha de una placa de acero conformado en forma cilíndrica y soldado longitudinalmente.
 - Carcasas de pequeños diámetros (hasta 24 pulgadas) pueden ser hechas cortando un tubo del diámetro deseado con la longitud correcta (*pipe shells*).

- La forma esférica de la carcasa es importante al determinar el diámetro de los reflectores que pueden ser insertados y el efecto de fuga entre el deflector y la carcasa.
- La boquilla de entrada suele tener una placa justo debajo de ella para evitar que la corriente choque directamente a alta velocidad en el tope del haz de tubos. Su impacto puede causar erosión, cavilación y vibraciones.
- Canales del lado de los tubos y boquillas: los canales y las boquillas simplemente dirigen el flujo del fluido del lado de los tubos hacia el interior o exterior de los tubos del intercambiador.
 - Como el fluido del lado de los tubos es generalmente el más corrosivo, estos canales y boquillas suelen ser hechos de materiales aleados (compatibles con la placa tubular). Deben ser revestidos en lugar de aleaciones sólidas.
- Cubiertas de canal: son placas redondas que están atornilladas a los bordes del canal y pueden ser removidas para inspeccionar los tubos sin perturbar el arreglo de los tubos.

2.1.1.2. Intercambiador de calor de placas

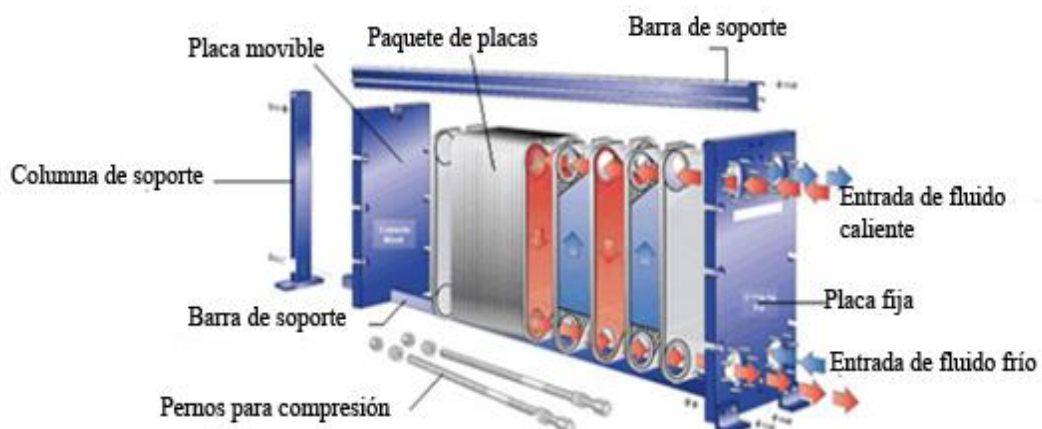
Los intercambiadores de calor de placa son de uso frecuente en fluidos de baja viscosidad con demandas moderadas de temperaturas y presión, típicamente por debajo de los 150°C.

El material de los sellos se elige preferentemente para soportar la temperatura de operación y conforme a las características del líquido de proceso. Hay varios tipos y diseños de intercambiadores de calor de placa que incluyen las siguientes características: con empaques o de sellos, soldados y semisoldados; pero son dos las construcciones básicas más difundidas:

- Intercambiador de placas con juntas, designado PHE (*Plate heat exchangers*).
- Intercambiador de placas soldadas, designado BHE (*Brazed heat exchangers*).

Se conocen indistintamente como intercambiadores compactos. En la figura 11, se pueden ver las partes básicas de un intercambiador de calor de placas.

Figura 11. **Partes de un intercambiador de calor de placas**



Fuente: <http://www.flowgasket.com/images/partes.jpg>. Consulta: septiembre de 2011.

Los PHE consisten en un conjunto de placas metálicas corrugadas montadas entre dos placas, una fija (bastidor) y otra móvil (de presión). Este paquete de placas a su vez, es soportado por dos barras guía, una superior y otra inferior, que apoyan sobre una columna o pedestal. El sellado entre placas se efectúa mediante juntas elastoméricas, las cuales a su vez dirigen los fluidos por canales alternos.

Las placas contienen orificios que permiten y dirigen el flujo de los fluidos. El conjunto de placas es comprimido mediante espárragos que aseguran el apriete y estanqueidad entre las mismas. Las conexiones de entrada y salida se localizan en la placa fija del bastidor, salvo en el caso de que haya más de un paso, donde se utilizan ambas placas del bastidor.

Los PHE son llamados también intercambiadores de placas y marcos (*Plate and frame*), por su similitud constructiva con los filtros prensas. Los empaques son instalados en cada una de estas placas y juegan el papel más importante en el trabajo de un intercambiador de calor a placas.

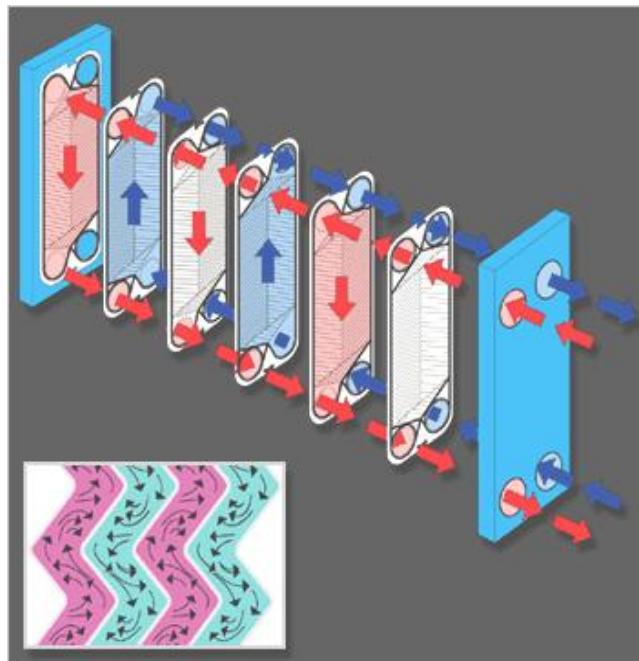
Los empaques se encargan de dirigir los fluidos de manera alterna a través del paquete de placas, formando entre cada dos placas, los canales por donde pasan los fluidos; es decir, el fluido caliente pasa por un lado de cada placa, mientras el fluido frío pasa por el lado opuesto de cada una de estas; es así como se logra el intercambio de calor entre ambos fluidos.

De no existir empaques, los fluidos no se pudieran direccionar y se tendría problemas de mezcla de fluidos o contacto entre ellos. El material de los empaques se selecciona de acuerdo con el compuesto químico de los fluidos y a su temperatura. Existen diferentes materiales para la fabricación de empaques, siendo los más comunes el Nitrilo (NBR), el EPDM y el Vitón®.

La calidad de los empaques depende básicamente de la correcta selección y mezcla de los componentes y el curado de estos en el proceso de termoformado; este último se logra aplicando la presión adecuada a la temperatura óptima por el tiempo requerido, hasta lograr la dureza y “cocido” perfecto del material.

En la figura 12 se aprecia cómo el fluido caliente (rojo) y el fluido frío (azul), intercambian su calor a través de las placas corrugadas. Cada dos placas, se forma un canal de circulación. El caudal total del fluido, se divide en partes iguales por la cantidad de placas del intercambiador.

Figura 12. **Dirección de los fluidos en el intercambiador de calor de placas**



Fuente: <http://adningeneria.com.ar/productos/api-schmidt-bretten/intercambiadores-de-calor-a-placas/>. Consulta: septiembre de 2011.

Este se vuelve a dividir por la cantidad de subcanales internos de cada placa. Este hecho eleva la velocidad de circulación, formándose un flujo turbulento, que optimiza el intercambio de calor y disminuye el riesgo de incrustaciones. Al final del recorrido total de cada placa, el fluido logra alcanzar el 100% de su temperatura. El número de placas utilizadas en un intercambiador de calor de placas depende de su capacidad de intercambio de calor (kW). Cuantas más placas tenga, mayor será su capacidad. En el caso de los BHE, las placas están soldadas entre sí y conectadas a dos placas finales de apoyo, no existiendo en ellos las juntas ni los elementos de soporte y apriete.

Las placas en estos equipos son soldadas entre sí con cobre o níquel 99% al vacío y forman una unidad compacta resistente a la presión. Este diseño ha sido concebido para las aplicaciones de alta presión y temperatura de trabajo y presentan la ventaja de poder ser montados directamente sobre las cañerías. La cantidad, tamaño, material y configuración geométrica de las placas dependerá de las características del proceso, esto es, del caudal, propiedades fisicoquímicas de los fluidos, temperaturas y pérdida de presión requeridas.

2.1.1.2.1. Diseño de las placas

El diseño de estos elementos está directamente relacionado con las características de la aplicación buscada, esto es, su configuración dependerá de:

- Tipo y propiedades de los fluidos que intercambian calor (líquidos, gases, vapores, emulsiones, viscosidad, presencia de partículas o fibras, corrosivos, *fouling*, etc.).

- Servicio buscado, calentamiento, enfriamiento, evaporación, condensación, etc.
- Caudales manejados, tiempos de retención y pérdidas de presión permitidas.

El diseño corrugado de las placas crea conductos a través de los cuales circulan los fluidos en capas de muy bajo espesor y con gran turbulencia, lo que origina una alta transferencia de calor.

Este escurrimiento turbulento a través de las placas hace también que los depósitos causados por fluidos sucios sean continuamente removidos de la superficie de transferencia durante la operación, lo que se traduce en un mayor coeficiente total de transferencia y en un mayor tiempo de trabajo del equipo sin necesidad de pararlo para limpieza.

La corrugación de las placas provoca turbulencia, en flujo laminar con números de Reynolds tan bajos como $Re: 10$ a 500 , que un intercambiador de casco y tubos sería imposible. El flujo turbulento producido por las corrugaciones rompe la película límite adherida a la superficie de transferencia, dando altos coeficientes de convección y un bajo nivel de ensuciamiento.

La elevada transferencia térmica en estos equipos no está dada solamente por el escurrimiento turbulento, sino también por los bajos espesores de película a través de las cuales se transmite el calor. Así, mientras en los intercambiadores de placas la distancia media entre ellas puede variar entre 1.6 a 5.5 mm, en los intercambiadores de casco y tubos, esta distancia media podrá variar entre 12.5 y 38 mm (tubos de $\frac{1}{2}$ a $1 \frac{1}{2}$ “).

Dependiendo de la transferencia de calor requerida y de las pérdidas de presión necesarias para lograrla, la geometría de las placas puede variar ampliamente. De esta forma se encontrarán placas llamadas *soft* que se caracterizan por tener bajos coeficientes de transferencia y pequeñas pérdidas de carga y las placas llamadas *hard* que inversamente darán los coeficientes de transmisión más altos con mayores pérdidas por fricción. Estas últimas son de una geometría más compleja pues son más largas y estrechas y tienen corrugaciones más profundas.

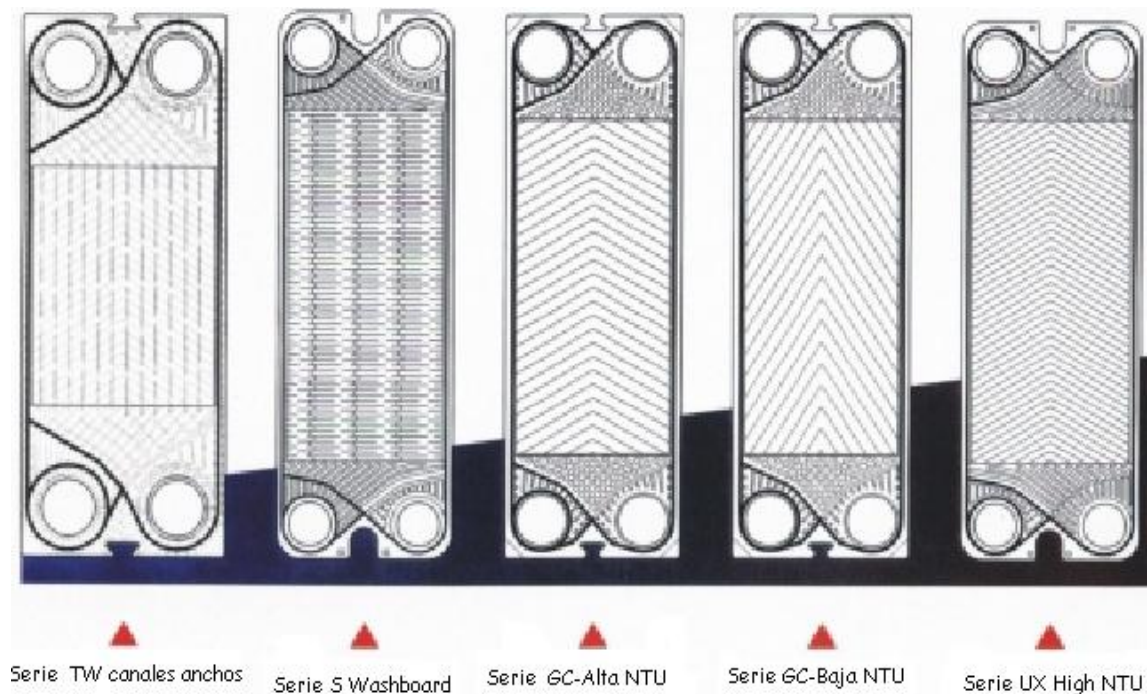
También tienen una menor separación entre placas. Las placas *soft* en cambio, son más cortas y anchas; en general tienen un diseño en ángulo agudo (Chevrons) que ofrece menor resistencia al flujo de fluidos, en tanto que las placas *hard* presentan corrugaciones en ángulo obtuso que conducen a mayores pérdidas de carga.

Combinando diferentes diseños de canales se podrán cubrir diferentes tipos de servicios. Las placas del tipo *hard* tienen corrugaciones transversales o diagonales a la dirección del flujo, lo que origina mayor turbulencia y transferencia térmica.

Las placas *soft* inversamente tienen ondulaciones en la dirección del flujo, lo que provocará menos turbulencia y transferencia de calor. La aptitud o performance de las distintas configuraciones geométricas de las placas para transferir calor quedan expresadas por el llamado número de unidades de transferencia de calor (NTU- *Number Transfer Units*). Así se verá que las placas antes definidas como *soft* y *hard* podrán ser caracterizadas por su correspondiente NTU. Una de las ventajas que ofrecen estos equipos es que en virtud de las diferentes geometrías de placas existentes, es posible efectuar combinaciones entre ellas para optimizar el proceso térmico.

De esta forma al mezclar placas con distintos ángulos y separaciones, se permite satisfacer distintos requerimientos mediante configuraciones de único paso, lo que simplifica las conexiones y el mantenimiento del equipo. La figura 13, muestra distintas configuraciones de placas, indicando aquellas con alto y bajo NTU.

Figura 13. **Configuración de placas de los intercambiadores de calor**



Fuente: <http://www.myequipos.com/2010/06/intercambiador-de-placas-parte-2.html>.

Consulta: septiembre de 2011.

2.1.2. Tipos de intercambiadores de calor según su operación

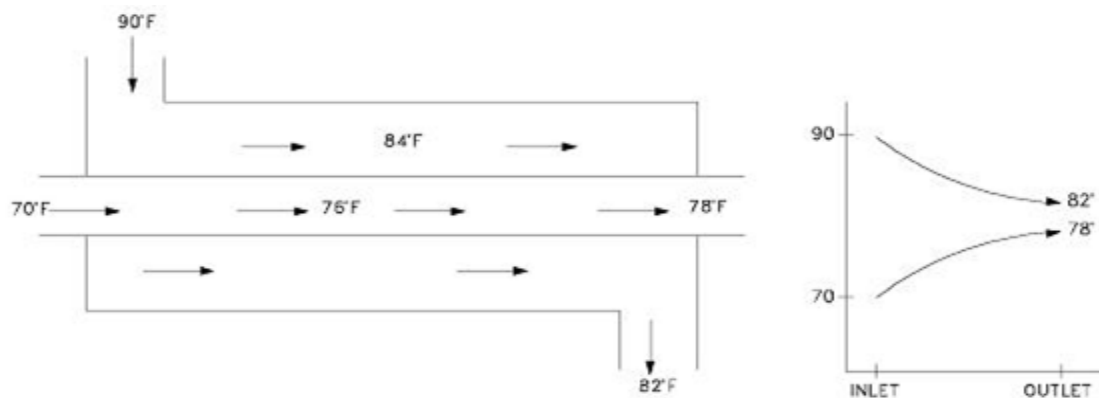
Ya que los intercambiadores de calor se presentan en muchas formas, tamaños, materiales de manufactura y modelos, estos son categorizados de acuerdo con características comunes.

Una de las características comunes que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos de fluido. Las tres categorías son: flujo paralelo, contraflujo y flujo cruzado.

2.1.2.1. Flujo paralelo

Como se ilustra en la figura 14, existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa, fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa.

Figura 14. Intercambiador de calor de flujo paralelo



Fuente: <http://dc190.4shared.com/doc/HBIXOgkF/preview.html>. Consulta: septiembre de 2011.

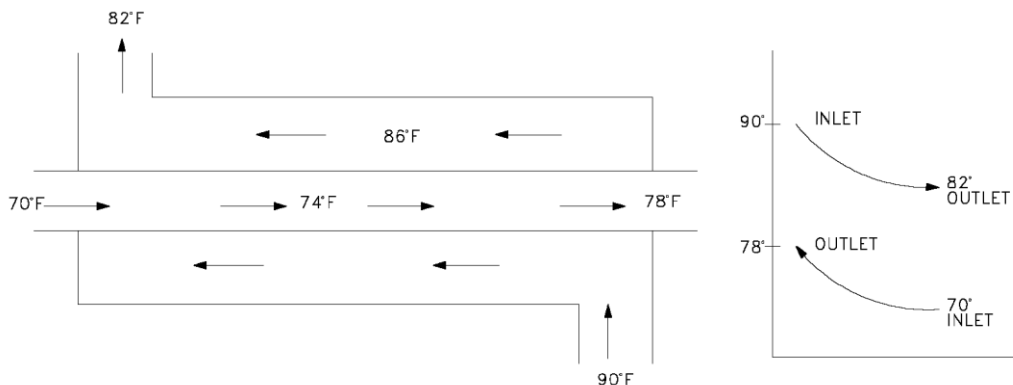
Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproxima la una a la otra; es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta, tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura, nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente.

2.1.2.2. Contraflujo

Como se ilustra en la figura 15, se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos.

Ya que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada.

Figura 15. Intercambiador de calor contraflujo



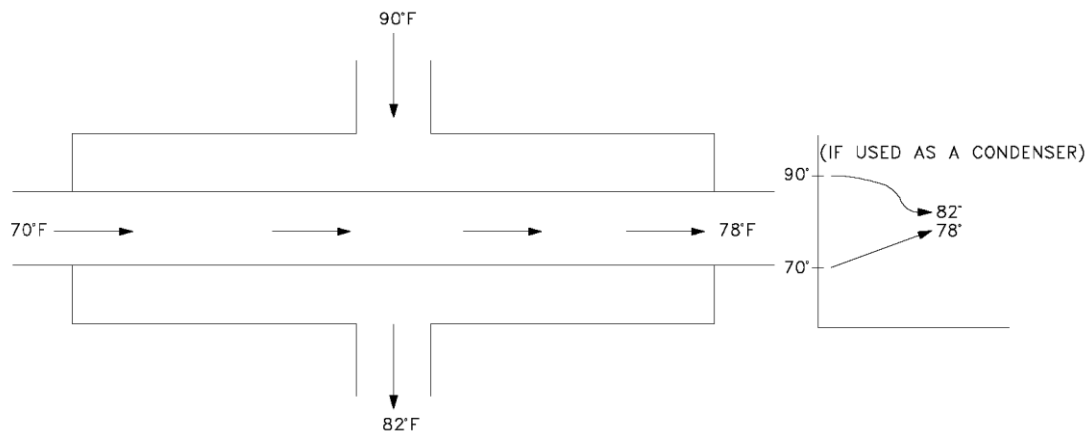
Fuente: <http://dc190.4shared.com/doc/HBIXOgkF/preview.html>. Consulta: septiembre de 2011.

Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente que el mencionado anteriormente. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente, una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador.

2.1.2.3. Flujo cruzado

En la figura 16, se muestra cómo en el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos, mientras que el otro lo hace alrededor de dichos tubos, formando un ángulo de 90°. Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usados donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásico.

Figura 16. Intercambiador de calor de flujo cruzado



Fuente: <http://dc190.4shared.com/doc/HBIXOgkF/preview.html>. Consulta: septiembre de 2011.

Un ejemplo típico de este tipo de intercambiador es en los sistemas de condensación de vapor, donde el vapor exhausto que sale de una turbina entra como flujo externo a la carcasa del condensador y el agua fría que fluye por los tubos absorbe el calor del vapor y este se condensa y forma agua líquida. Se pueden condensar grandes volúmenes de vapor de agua al utilizar este tipo de intercambiador de calor.

En la actualidad, la mayoría de los intercambiadores de calor no son puramente de flujo paralelo, contraflujo, o flujo cruzado; estos son comúnmente una combinación de los dos o tres tipos de intercambiador.

Desde luego, un intercambiador de calor real que incluye dos, o los tres tipos de intercambio descritos anteriormente, resulta muy complicado de analizar.

La razón de incluir la combinación de varios tipos en uno solo, es maximizar la eficacia del intercambiador dentro de las restricciones propias del diseño, que son: tamaño, costo, peso, eficacia requerida, tipo de fluidos, temperaturas y presiones de operación, que permiten establecer la complejidad del intercambiador.

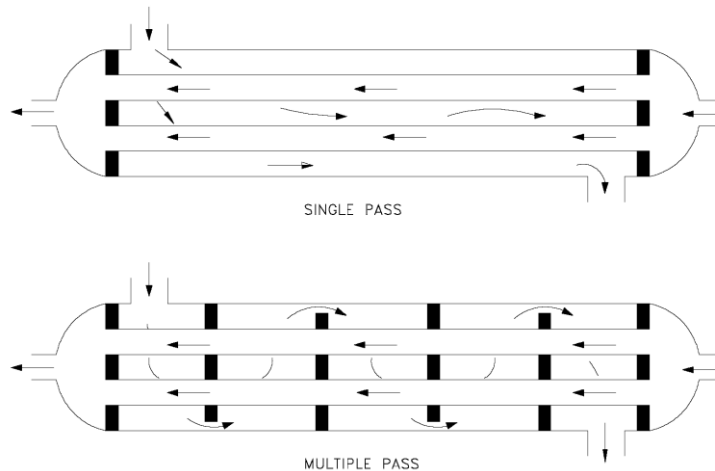
2.1.2.4. Intercambiadores de un solo paso (o paso simple) y de múltiples pasos

Un método que combina las características de dos o más intercambiadores y permite mejorar el desempeño de un intercambiador de calor, es tener que pasar los dos fluidos varias veces dentro de un intercambiador de paso simple.

Cuando los fluidos del intercambiador intercambian calor más de una vez, se denomina intercambiador de múltiples pasos.

Sí el fluido sólo intercambia calor en una sola vez, se denomina intercambiador de calor de paso simple o de un solo paso.

Figura 17. **Intercambiador de calor de un solo paso y múltiple paso**



Fuente: <http://dc190.4shared.com/doc/HBIXOgkF/preview.html>. Consulta: septiembre de 2011.

En la figura 17 se muestra un ejemplo de estos intercambiadores. Comúnmente el intercambiador de múltiples pasos invierte el sentido del flujo en los tubos, al utilizar dobleces en forma de "U" en los extremos, es decir, el doblez en forma de "U" permite al fluido fluir de regreso e incrementar el área de transferencia del intercambiador. Un segundo método para llevar a cabo múltiples pasos es insertar baffles o platos dentro del intercambiador.

2.2. **Enfriadores (*chillers*)**

Un *chiller* (o enfriador de agua) es un aparato industrial que produce agua fría para el enfriamiento de procesos industriales. La idea consiste en extraer el calor generado en un proceso por contacto con agua a una temperatura menor a la que el proceso finalmente debe quedar. Así, el proceso cede calor bajando su temperatura y el agua, durante el paso por el proceso, la eleva. El agua ahora "caliente" retorna al *chiller*, donde se reduce su temperatura para ser enviada nuevamente al proceso.

Un *chiller* es un sistema completo de refrigeración que incluye un compresor, un condensador, evaporador, válvula de expansión (evaporación), refrigerante y tuberías, además de bomba de impulsión de agua desde el proceso, sistema electrónico de control del sistema, depósito de agua, gabinete, etc. Distintos procesos requieren alimentarse con distintos caudales, presiones y temperaturas de agua.

El agua se puede enfriar a temperaturas finales que alcanzan los 20°C o inclusive temperaturas negativas con la adición de anticongelantes, como por ejemplo -20°C.

Los “*chillers*”, se presentan en diferentes tamaños y formas, dependiendo del fabricante, con capacidades que van de una a varias toneladas de refrigeración (TR).

Se emplean diferentes tipos de compresores de refrigeración como pueden ser del tipo semihermético, hermético o de tornillo. Los evaporadores suelen ser del tipo casco y tubo, aunque pueden ser también de placas; todo dependerá de la aplicación. Los condensadores de los “*chillers*” suelen ser principalmente enfriados por aire, aunque puede haber enfriados por agua.

2.2.1. Tipos de enfriadores

Existen dos tipos de enfriadores: de compresión mecánica y de absorción. Los enfriadores de absorción usan como fuente de energía gas natural, agua caliente o vapor para crear el ciclo de refrigeración sin hacer uso de compresión mecánica. En lugar de tener un compresor tienen un generador y un absorbedor, usan el agua como refrigerante, además de un segundo líquido llamado absorbente: bromuro de litio, una sal no tóxica.

Como ventaja sobre los de compresión mecánica es que estos enfriadores una vez instalados y operando consumen menos energía. Dado a que estos enfriadores son muy poco utilizados, además de que los costos iniciales para ponerlos a trabajar desde cero son muy altos, no se profundizará en detalles en esta clase de enfriadores.

2.2.1.1. Enfriadores de compresión mecánica

Los enfriadores de compresión mecánica están clasificados según el tipo de compresor que usan, los cuales pueden ser: reciprocante, *scroll*, de tornillo y centrífugo. El tipo de compresor usado generalmente tiene un gran impacto en la eficiencia y confiabilidad de un enfriador de agua por compresión mecánica. La mejora en el diseño y desarrollo de nuevas tecnologías de compresores ha desarrollado enfriadores de agua más eficientes y confiables.

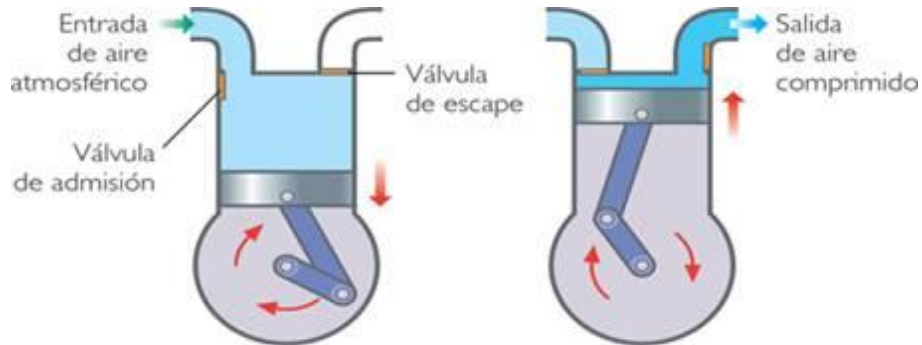
2.2.1.1.1. Compresor reciprocante

Trabajan de forma similar al motor de un automóvil, con pistones; poseen un cigüeñal accionado por un motor eléctrico o un motor de combustión interna.

Los pistones compresionan el gas calentado en el proceso. El gas caliente es descargado al condensador en lugar de ser expelido a la tubería de escape. Los pistones tienen válvulas de admisión y escape que pueden ser abiertas, según la demanda, para permitir al pistón funcionar en vacío, el cual reduce la capacidad del *chiller* cuando la demanda de agua es reducida.

Este estado de funcionamiento en vacío permite a un simple compresor proveer un rango de capacidades que mejor se adecue al sistema de carga. En la figura 18, se puede ver el funcionamiento básico de los pistones.

Figura 18. **Pistones del compresor recíprocante**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos63/compresores-embolo-piston/compresores-embolo-piston2.shtml>. Consulta: octubre de 2011.

2.2.1.1.2. **Compresor centrífugo**

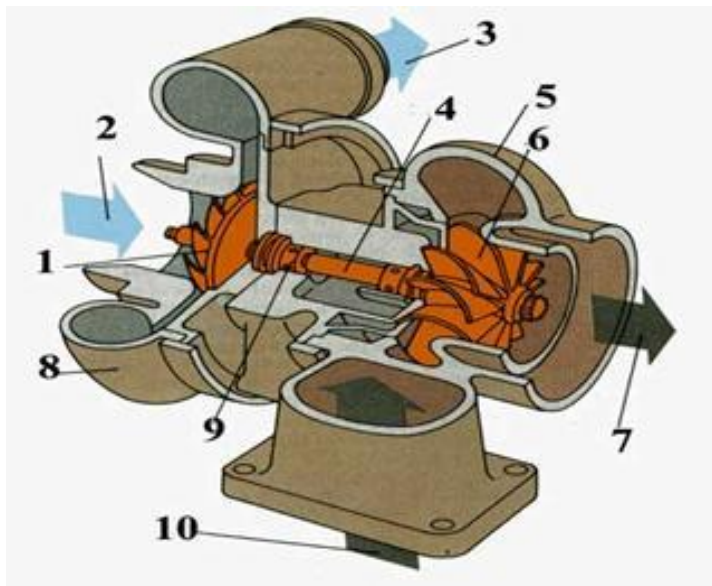
Este opera más como una bomba de agua centrífuga, con impulsor que comprime el refrigerante. Los *chillers* centrífugos proporcionan alta capacidad de enfriamiento con un diseño compacto. Pueden ser equipados con entrada de turbina o variador de frecuencia para regular la capacidad del *chiller*.

- Ventajas:
 - La ausencia de piezas rozantes en la corriente de compresión permite trabajar un largo tiempo entre intervalos de mantenimiento, siempre y cuando los sistemas auxiliares de aceites lubricantes y aceites de sellos estén correctos.
 - Se puede obtener grandes volúmenes en un lugar de tamaño pequeño. Esto puede ser una ventaja cuando el terreno es muy costoso.

- Su característica es un flujo suave y libre de pulsaciones.
- Desventajas:
 - Los compresores centrífugos son sensibles al peso molecular del gas que se comprime. Los cambios imprevistos en el peso molecular pueden hacer que las presiones de descarga sean muy altas o muy bajas; esta característica no la comparte con el compresor de tipo alternativo.
 - Se necesitan velocidades muy altas en las puntas para producir la presión. Con la tendencia a reducir el tamaño y a aumentar el flujo; hay que tener mucho más cuidado al balancear los motores y con los materiales empleados en componentes sometidos a grandes esfuerzos.
 - Un aumento pequeño en la caída de presión en el sistema de proceso puede ocasionar reducciones muy grandes en el volumen del compresor.
 - Se requiere un complicado sistema para aceite lubricante y aceite para sellos.

En la figura 19, se muestran las principales partes de un compresor centrífugo.

Figura 19. **Partes principales de un compresor centrífugo**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos63/compresores-embolo-piston/compresores-embolo-piston2.shtml>. Consulta: octubre de 2011.

Se describen las partes del compresor, señalando el nombre del número correspondiente:

1. Turbina del compresor
2. Entrada de gas (aire)
3. Mezcla comprimida que va hacia los cilindros
4. Eje o flecha, que debe mantenerse lubricado con aceite que le llega del motor
5. Cubierta de la turbina
6. Turbina el cargador
7. Salida de gases, hacia el sistema exterior
8. Cubierta del compresor
9. Rodaje balero o cojinete
10. Soporte del compresor

2.2.1.1.3. Compresor *Scroll*

Este tipo de compresor utiliza dos espirales para realizar la compresión del gas. Las espirales se disponen cara contra cara. Siendo la superior fija y la que incorpora la puerta de descarga.

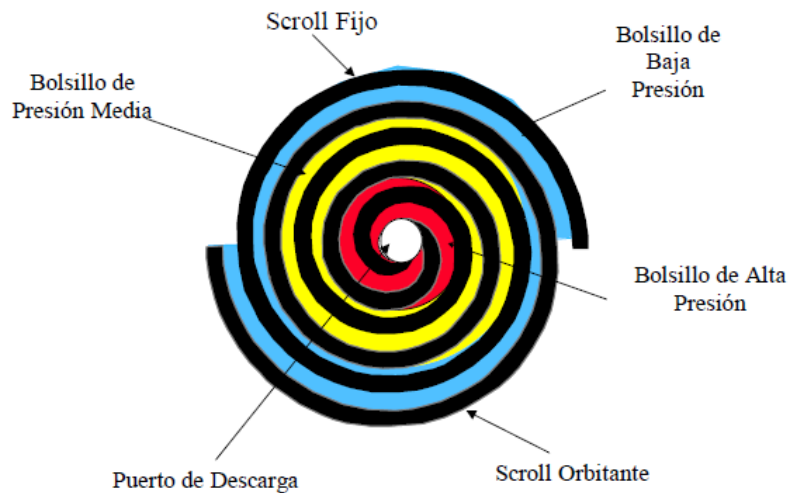
La inferior es la espiral motriz; las espirales disponen de sellos a lo largo del perfil en las cargas opuestas.

Estos actúan como segmentos de los cilindros, proporcionando un sello de refrigerante entre ambas superficies; el centro del cojinete de la espiral y el centro del eje del cigüeñal del conjunto motriz están desalineados.

Esto produce una excentricidad o movimiento orbital de la espira móvil; el movimiento orbital permite a las espirales crear bolsas de gas, y como la acción orbital continúa, el movimiento relativo entre ambas espirales, fija y móvil, obliga a las bolsas de refrigerante a desplazarse hacia la puerta de descarga en el centro del conjunto, disminuyendo progresivamente el volumen.

Durante el primer giro o fase de aspiración, la separación de las paredes de las espirales permite al gas entrar; al completar el giro, las superficies de las espirales se vuelven a unir formando las bolsas de gas; durante el segundo giro o fase de compresión, el volumen de las bolsas de gas se reduce progresivamente, la finalización del segundo giro produce la máxima compresión; durante el tercer giro o fase de descarga, la parte final del *scroll* obliga al gas comprimido a salir a través de la puerta descargada. En la figura 20 se muestra, la operación de un compresor *scroll*.

Figura 20. **Operación de un compresor Scroll**



Fuente: <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2010/04/compresion-scroll-mejoras-en-forma-de-espiral/>. Consulta: octubre de 2011.

Han salido como una alternativa de los compresores recíprocos, y están generalmente disponibles en configuración hermética con capacidades arriba de 15 toneladas (53 kW). Son a menudo usados en *chillers* que satisfacen grandes capacidades.

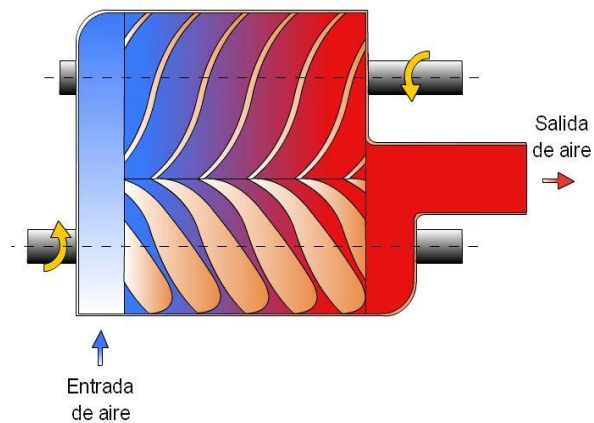
En general los *chillers* con compresores scroll son 10 a 15% más eficientes que los recíprocos, y son muy confiables debido a que tienen aproximadamente 60% de menos partes móviles, comparados con el recíproco.

2.2.1.1.4. **Compresor de tornillo**

El compresor de tornillo es de desplazamiento, con pistones en forma de tornillo; este es el tipo de compresor de uso predominante en la actualidad.

Las piezas principales del elemento de compresión de tornillo comprenden rotores machos y hembras que se mueven unos hacia otros, mientras se reduce el volumen entre ellos y el alojamiento. La relación de presión de un tornillo depende de la longitud y perfil de dicho tornillo y de la forma del puerto de descarga.

Figura 21. **Compresor de tornillo succionando gas**



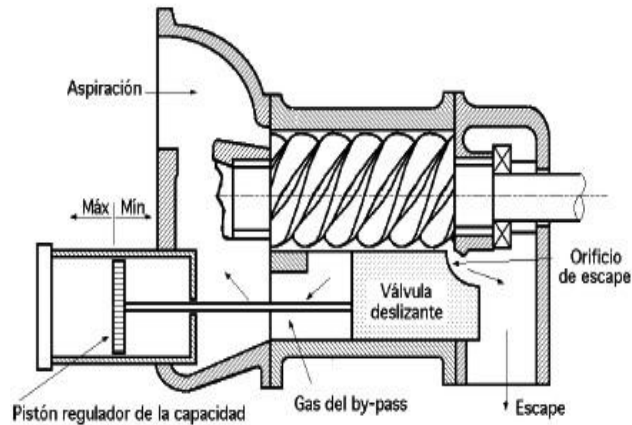
Fuente: http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_neumatica/neumatica_indice.html.

Consulta: octubre de 2011.

El tornillo no está equipado con válvula alguna y no existen fuerzas mecánicas para crear desequilibrio.

Por tanto, puede trabajar a altas velocidades de eje y combinar un gran caudal con unas dimensiones exteriores reducidas. En la figura 21 se puede apreciar la forma en que trabajan, y en la figura 22, las partes principales de estos compresores.

Figura 22. **Componentes básicos del compresor de tornillo**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos63/compresores-embolo-piston/compresores-embolo-piston2.shtml>. Consulta: octubre de 2011.

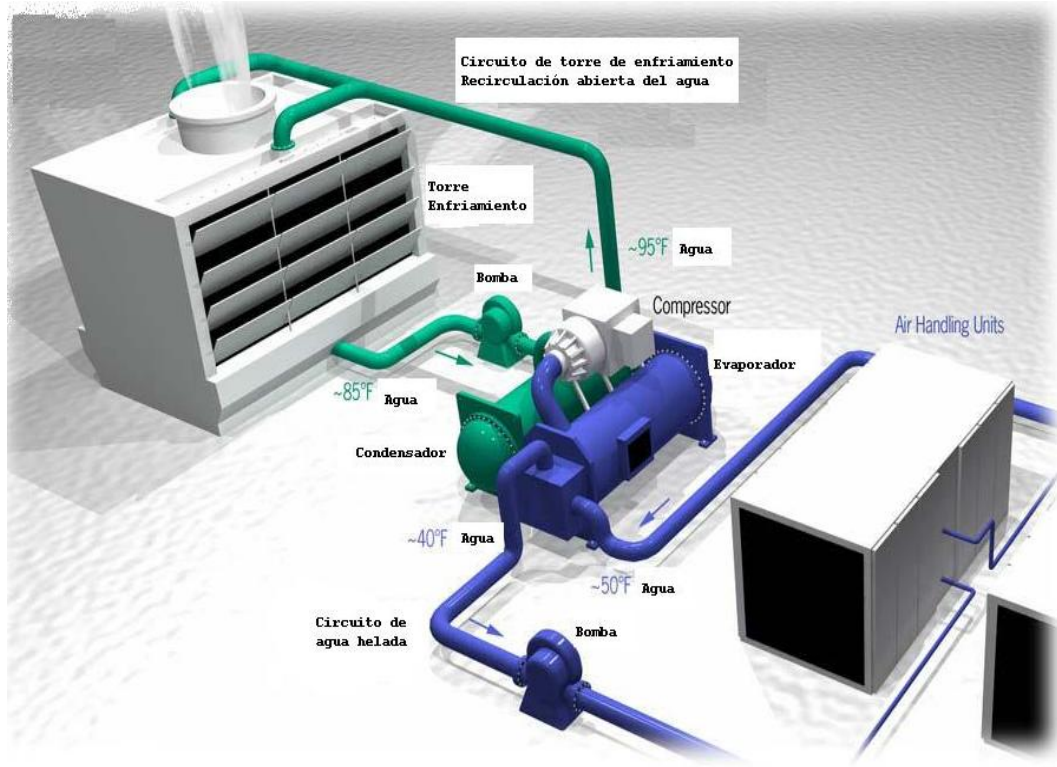
Al girar los tornillos, el aire entra por la válvula de admisión con el aceite. El espacio entre los labios es progresivamente reducido al correr por el compresor, comprimiendo el aire atrapado hasta salir por la válvula de salida. Tiene las siguientes características:

- Silencioso, pequeño y de bajo costo
- Flujo continuo de aire
- Fácil mantenimiento
- Presiones y volúmenes moderados

En los compresores a tornillo húmedos, los engranajes y tornillos son lubricados por el aceite que actúa también como sello. Típicamente tienen filtros coalescentes para eliminar el aceite del aire o gas comprimido. Los compresores a tornillo secos (*"oil-free"*) requieren lubricación de sus engranajes, cojinetes y/o rodamientos, pero los tornillos operan en seco.

Los tornillos normalmente operan en el régimen de lubricación límite y mixta, mientras los engranajes trabajan con lubricación hidrodinámica.

Figura 23. **Montaje y operación de un *chiller* mecánico**



Fuente: <http://www.betterbricks.com/graphics/assets/documents/BOpEqSysChillers.pdf>.

Consulta: octubre de 2011.

2.2.2. Descripción de las partes del enfriador mecánico

Para lograr este objetivo, un enfriador de líquido está constituido por cuatro componentes principales; además, accesorios e instrumentos de control y seguridad. En la figura 23 se muestra gráficamente el montaje de un *chiller*, con los componentes principales.

El *chiller* básicamente opera como lo indica el ciclo de Carnot: un fluido refrigerante (usualmente conocido a través de la marca comercial Freón) en estado líquido, se fuerza a experimentar su evaporación debido a una baja de presión en el sector conocido como evaporador, donde además y fundamentalmente, toma calor del agua con la que indirectamente se pone en contacto; en la figura 23 se ve la operación del *chiller*.

Exactamente en el evaporador es donde se produce el enfriamiento propiamente dicho del agua. Ahora el agua sigue camino al proceso por su circuito y el refrigerante en estado de vapor es comprimido por un compresor frigorífico, obligándolo a recorrer el circuito de refrigeración.

Seguidamente, el refrigerante en estado de vapor, ingresa al condensador donde se convierte al estado líquido, liberando el calor que sustrajo en el evaporador. Para esto, en el caso de los *chillers* condensados por aire, el calor sale del refrigerante para pasar al aire ambiente por acción de ventiladores que fuerzan al aire a intercambiar con el refrigerante.

En resumen, en el evaporador, el agua se enfría (baja su temperatura) mientras que el refrigerante se calienta (se evapora sin cambio de temperatura) en la exacta misma medida.

Después, en el condensador, el refrigerante vuelve al estado líquido cediéndole calor al aire ambiente (que eleva su temperatura).

Esta liberación de calor, al efectuarse en un lugar distinto al original (enfriamiento del agua), consigue un efecto neto de "movimiento de calor" del proceso al ambiente.

2.2.2.1. El compresor

El compresor es el corazón del sistema, ya que es el encargado de hacer circular al refrigerante a través de los diferentes componentes del sistema de refrigeración del “*chiller*”. Succiona el gas refrigerante sobrecalentado a baja presión y temperatura, lo comprime aumentando la presión y la temperatura a un punto tal, que se puede condensar por medios condensantes normales (aire o agua). A través de las líneas de descarga de gas caliente, fluye el gas refrigerante a alta presión y temperatura hacia la entrada del condensador.

2.2.2.2. El evaporador

La función del evaporador, que es un intercambiador de calor del tipo casco y tubo, es proporcionar una superficie para transferir calor del líquido a enfriar, al refrigerante, en condiciones de saturación.

Mediante la línea de succión fluye el gas refrigerante como vapor a baja presión proveniente del evaporador a la succión del compresor, es el componente del sistema de refrigeración donde se efectúa el cambio de fase del refrigerante. Es aquí donde el calor del agua es transferido al refrigerante, el cual se evapora al tiempo de ir absorbiendo el calor.

2.2.2.3. El condensador

El condensador es el componente del sistema que extrae el calor del refrigerante y lo transfiere al aire o al agua. Esta pérdida de calor provoca que el refrigerante se condense. Su función es proporcionar una superficie de transferencia de calor, a través de la cual pasa el calor del gas refrigerante caliente al medio condensante.

Mediante la línea de líquido fluye el refrigerante en estado líquido a alta presión, a la válvula termostática de expansión.

2.2.2.4. La válvula termostática

La válvula termostática de expansión tiene como finalidad controlar el suministro apropiado del líquido refrigerante al evaporador, así como reducir la presión del refrigerante de manera que vaporice en el evaporador a la temperatura deseada.

2.2.2.5. Dispositivos y controles

Para que un enfriador de líquido trabaje en forma automática, es necesario instalarle ciertos dispositivos eléctricos, como los controles de ciclo.

Los controles que se usan en un enfriador son de acción para temperatura, llamados termostatos de acción por presión, presostatos y los de protección de falla eléctrica llamados relevadores.

Los principales dispositivos y controles del un “*chiller*” son:

- Termostatos: son dispositivos que actúan para conectar o interrumpir un circuito en respuesta a un cambio de temperatura, instalados en esta unidad, cierran un circuito (conectan) con un aumento de temperatura y lo interrumpirían (desconectarán) con un descenso de temperatura.
- Presostato de baja presión: este se conecta en la succión del compresor y opera (abre el circuito) cuando existe una baja presión en el sistema, por una baja de temperatura en el fluido; actúa como control de

seguridad, por falta de refrigerante o por alguna obstrucción en la línea de líquido o de succión.

- Presostato de alta presión: actúa (abre el circuito) como un dispositivo de seguridad al incrementar la presión a un nivel arriba de lo normal; este dispositivo es de restablecimiento manual; el disparo de alta presión puede ocasionarse por obstrucción en el condensador, altas temperaturas en el área de enfriamiento, mal funcionamiento de los abanicos, desajuste en la válvula de expansión, obstrucción en la línea de líquido, etc.
- Calefactor de cárter: tiene por objeto calentar el aceite del compresor para que al iniciar la operación este tenga las condiciones correctas de viscosidad; al parar el compresor el calefactor se energiza, evaporando cualquier vestigio de refrigerante líquido en el cárter; al arrancar la unidad se desenergiza automáticamente.
- Filtro deshidratador de succión: se encuentra instalado en la línea de succión y tiene por objeto absorber cualquier humedad que contenga el refrigerante, así como detener cualquier partícula extraña que viaje al compresor.
- Filtro deshidratador de líquido: se encuentra instalado en la línea de líquido y tiene por objeto absorber cualquier humedad que contenga el refrigerante, así como detener cualquier partícula extraña que viaje al compresor.
- Indicador de líquido: el indicador de líquido o cristal mirilla instalado también en la línea de líquido, permite verificar visualmente que el

sistema tenga su carga completa de refrigerante, o que este se mantenga seco.

2.2.2.6. Circuito de control

El circuito de control se encarga de controlar los paros y arranques de los motores del “*chiller*”, así como de las señales de alarma.

Las líneas y accesorios de refrigeración conducen el refrigerante de un componente a otro del sistema de refrigeración, regulando, filtrando y controlando el paso del refrigerante.

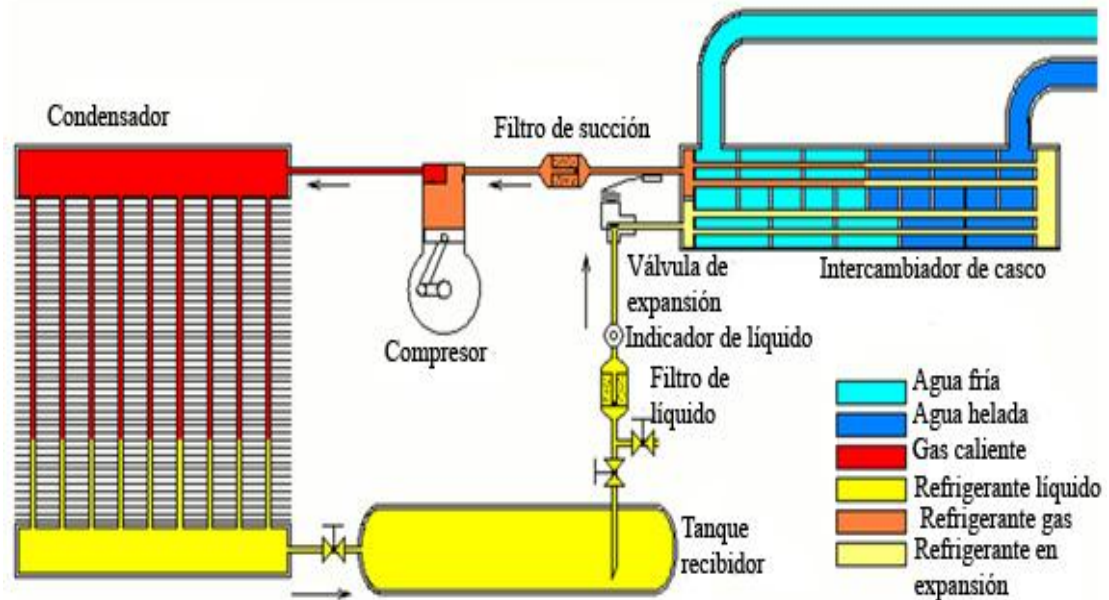
El gabinete encierra y protege los componentes de control y es el soporte de todos los componentes del equipo.

El refrigerante extrae el calor del medio a enfriar y lo disipa en un medio frío como agua o aire.

2.2.3. Funcionamiento del *chiller* mecánico

El objetivo es extraer el calor sensible del agua o salmuera, empleando un medio refrigerante; en la actualidad los medios refrigerantes más comunes son los CFC Y HCFC, por lo que la operación se basa en las curvas de operación de los mismos. De una manera sencilla, en la figura 24 se puede ver el funcionamiento del *chiller*. El agua que se quiere enfriar se hace circular a través de un intercambiador del tipo casco y tubo (principalmente por el casco). Este flujo de agua transmitirá su calor al flujo del refrigerante, ya que este se encuentra separado por la pared del tubo. El refrigerante, al recibir el calor se evapora, debido a sus características y a la baja presión de evaporación.

Figura 24. Esquema básico de funcionamiento de un *chiller*



Fuente: http://transfermaker.com.mx/boletines_que_es_chiller.html. Consulta: octubre de 2011.

El gas refrigerante es extraído por el compresor, el cual lo envía comprimido hacia el condensador.

Durante este proceso, el refrigerante se calienta por el efecto de la compresión y del calor del motor del compresor, en sistemas con compresor hermético y semihermético.

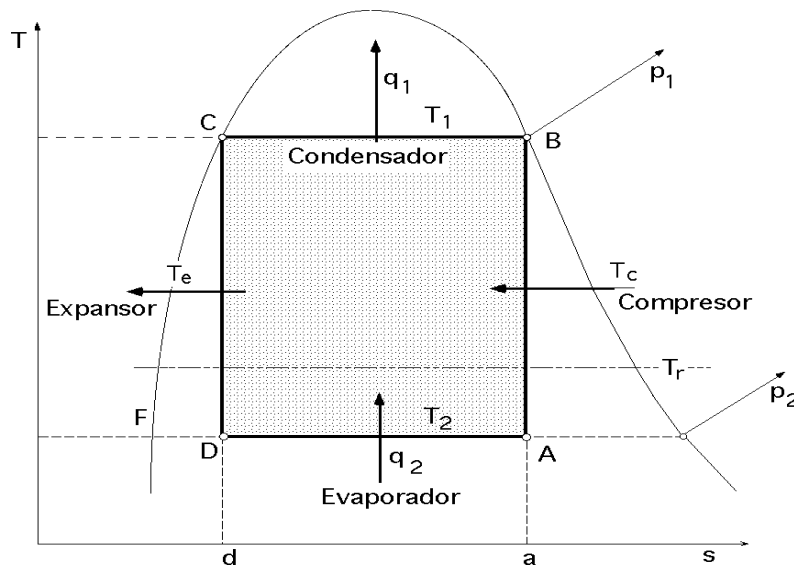
El gas caliente del compresor entra al condensador en donde su calor es transmitido a un medio refrigerante que bien puede ser agua o aire principalmente. El calor extraído provoca que el refrigerante se condense a alta presión. El refrigerante en estado líquido a alta presión, puede ser almacenado o enviado directamente a la válvula de expansión para su inyección en el evaporador, y así reiniciar el ciclo.

2.2.3.1. Ciclo de Carnot de un fluido condensable

Anteriormente se explicó que un *chiller* opera en el ciclo de Carnot; ahora se verá a qué se refiere esto. La ventaja del ciclo de una máquina frigorífica de fluidos condensables respecto de la máquina frigorífica de gas, radica en la utilización del fluido en sus dos fases, líquida y gaseosa, que permite no solo el que técnicamente se pueda realizar el ciclo de Carnot inverso, sino porque las temperaturas al final de la expansión y a la entrada en el compresor son iguales, por lo que se puede optimizar el coeficiente de efecto frigorífico.

El funcionamiento de una máquina frigorífica de fluidos condensables que utiliza un ciclo de Carnot, (figura 25) es como sigue:

Figura 25. Ciclo de Carnot de un fluido condensable



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/ciclos-refrigeracion-compresion/ciclos-refrigeracion-compresion.pdf>. Consulta: octubre de 2011.

Un compresor accionado por un motor aumentaría la presión del fluido desde P_2 a P_1 , según la transformación (AB), alcanzándose la temperatura T_1 ; esta compresión sería seguida de una condensación isoterma (BC) en la que el calor q_1 es evacuado al foco térmico caliente; el agua fría del condensador juega el papel de foco caliente de la máquina frigorífica, circulando en contracorriente con el fluido que viene del compresor y absorbiendo el calor q_1 .

El fluido, una vez licuado, se expande isotrópicamente en un expansor (CD), disminuyendo su presión y temperatura, con lo que se vaporiza parcialmente, llegando en estas condiciones al evaporador, estado D, iniciándose la vaporización isoterma (DA), durante la cual el calor q_2 puede ser absorbido del recinto a enfriar, o de una disolución de NaCl (salmuera), que circularía en contracorriente con el vapor, a una temperatura T_r mayor que T_2 .

Esta sustancia se puede enfriar hasta -15°C sin congelar, actuando como fuente fría; la salmuera así refrigerada circularía por conducciones apropiadas para la refrigeración de otro sistema. La parte evaporada del fluido condensable vuelve al compresor, iniciándose de nuevo el ciclo.

El área por debajo de (DA) representaría el calor q_2 absorbido a la fuente fría de valor $(i_A - i_D)$ y el área (ABCD) sería el trabajo T_C aplicado al fluido por el compresor. El coeficiente de efecto frigorífico viene dado por:

$$COP = \frac{q_2}{T_c - T_e} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad \text{Ec. 1}$$

El fluido que recorre el ciclo debe licuar fácilmente, por lo que su temperatura crítica tiene que ser superior a las temperaturas máximas de funcionamiento del fluido.

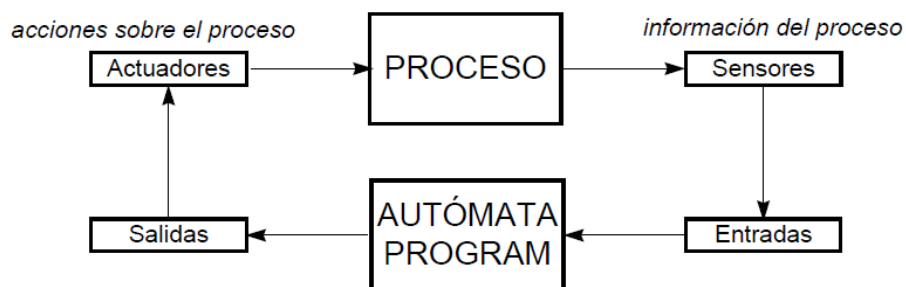
El trabajo mínimo reversible, necesario para extraer el calor q_2 del foco frío es:

$$T_{\min.rev} = q_1 - q_2 = q_2 \frac{T_1}{T_2} - q_2 = q_2 \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{q_2}{COP_c} \Rightarrow COP_c = \frac{q_2}{T_{\min.rev}} \quad (\text{Ec. 2})$$

3. CONTROLES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLC)

Un PLC, podría definirse inicialmente como un equipo electrónico basado en microprocesador, estructurado en una configuración modular, que puede programarse en un lenguaje no informático, y diseñado para controlar en tiempo real y en ambientes industriales, procesos de evolución secuencial. Un diagrama de bloques de la forma en la que se instala un autómatas en un proceso para su control, se muestra en la figura 26.

Figura 26. **Proceso controlado por un PLC**



Fuente: <http://www.infopl.net/descargas/36-rockwell/313-iniciacion-a-la-programacion-de-un-plc-control-logix-5500>. Consulta: noviembre de 2011.

Dicho en otros términos, se trata de un dispositivo comercial pensado para resolver de forma programada la automatización de una máquina de estados, en un entorno con características muy particulares.

La clave principal para la aceptación de los PLCs en la industria, fue que el lenguaje de programación inicial estaba basado en los diagramas de escalera y símbolos electrónicos, comúnmente usados por los electricistas.

Casi todo el personal de la planta ya estaba capacitado en lógica de escalera y fácilmente la adoptaron para los PLCs. De hecho, la lógica de escalera todavía juega un papel muy importante en la programación y en la localización y corrección de problemas, a pesar de que se han desarrollado lenguajes de programación más avanzados.

3.1. Características fundamentales

Como puntos fuertes de los PLCs frente a otras posibles soluciones de automatización, se pueden mencionar:

- **Confiabilidad:** una vez que un programa se ha escrito y se han localizado y corregido los errores, este puede fácilmente transferirse y descargarse a otros PLCs. Esto reduce el tiempo de programación, y la localización y corrección de errores, y aumenta la confiabilidad. Con toda la lógica que existe en la memoria de los PLCs, no es probable que se cometan errores de cableado de lógica. El único cableado necesario es para la alimentación eléctrica y para las entradas y las salidas.
- **Flexibilidad:** las modificaciones que se realizan en el programa pueden hacerse con solo presionar unas cuantas teclas. Los fabricantes del equipo original pueden fácilmente implementar actualizaciones al sistema, enviando un programa nuevo en vez de una persona de servicio. Los usuarios finales pueden modificar el programa en su puesto de trabajo, o contrariamente, los fabricantes del equipo original pueden evitar que los usuarios finales alteren el programa (importante característica de seguridad).

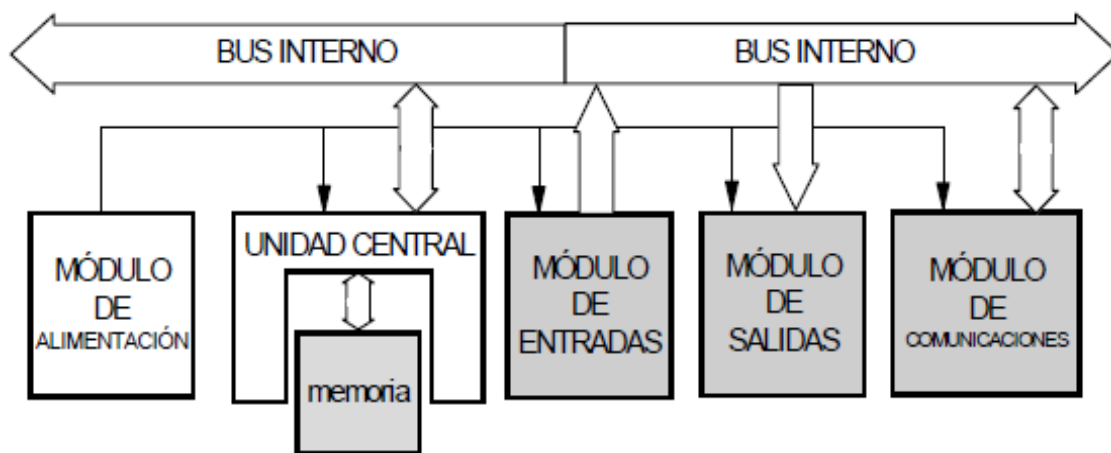
- **Funciones avanzadas:** los PLCs pueden ejecutar una amplia variedad de tareas de control, desde una sola acción repetitiva hasta el control complejo de datos. La estandarización de los PLCs abre muchas puertas a los diseñadores y simplifica el trabajo para el personal de mantenimiento.
- **Comunicaciones:** la comunicación con interfaces de operador, otros PLCs o computadoras, facilita la recogida de datos y el intercambio de información.
- **Velocidad:** la velocidad en el procesamiento de datos aumenta considerablemente el número de operaciones. Muchas aplicaciones de automatización requieren de la capacidad de respuesta rápida del PLC.
- **Diagnósticos:** la capacidad de localización y corrección de problemas de los dispositivos de programación y los diagnósticos que residen en el PLC, permiten a los usuarios localizar y corregir fácilmente los problemas de software y hardware (esta característica aumenta la calidad del sistema de control).

3.2. Hardware

El PLC está constituido por un conjunto de bloques funcionales organizados de forma modular y conectados a un bus interno de comunicaciones. Cada bloque está formado por un módulo específico diseñado para desarrollar tareas a su vez muy específicas, como la gestión de entradas y salidas, gestión de la memoria, unidad de control de proceso, comunicaciones, etc.

Esta organización modular permite una gran flexibilidad de configuración para las necesidades de control de cada proceso industrial, que pueden llegar a ser muy dispares, y persigue un diagnóstico y mantenimiento sencillos del propio PLC. Un esquema de esta configuración se muestra en la figura 27.

Figura 27. **Constitución modular de un autómeta programable**



Fuente: <http://www.infopl.net/descargas/36-rockwell/313-iniciacion-a-la-programacion-de-un-plc-control-logix-5500>. Consulta: noviembre de 2011.

A continuación se listan las partes que forman la estructura modular del PLC.

- Alimentación: normalmente es la utilizada en la industria: 110 voltios ac, 380 voltios trifásicos. La fuente debe ser capaz de eliminar todas las interferencias originadas en la red por las máquinas eléctricas y ser autónomas, para la prevención de fallos de red.
- Unidad central (unidad de control de proceso (CPU)): es el microprocesador cerebro del PLC. Pueden ser microestándares como los

utilizados en los ordenadores, o pueden ser de diseño específico para los PLCs. Los más avanzados son los sistemas multiprocesador.

- Memoria ram: memoria de acceso aleatorio, donde eventualmente se guardan los datos y programas en ejecución. Debido a su mínimo consumo puede alimentarse con baterías de seguridad.
- Memoria rom: memoria de solo lectura en cualquiera de sus modalidades, en la que se almacenan los programas supervisores y datos de inicialización, como si de un sistema operativo se tratase. Se suele denominar con el nombre de marcas a las posiciones de memoria de los PLCs.
- Entradas digitales aisladas del resto del equipo y con masa propia: el número es variable y normalmente es un punto importante para encarecer o abaratar el PLC. Existen indicadores luminosos que muestran el estado lógico en el que se encuentran, lo que simplifica el seguimiento y programación de algoritmos de control, a veces muy complejos.
- Salidas digitales de contactos libres o de relé: así se facilita la alimentación externa de los mandos. Su número es variable y normalmente influye sobre el precio del PLC. Existen indicadores luminosos que muestran el estado lógico en el que se encuentran, lo que simplifica el seguimiento y programación de algoritmos de control.
- Entradas analógicas: pueden ser en tensión o corriente o especiales para transductores como termopares, PTC, NTC, LVDT, etc. La resolución y

velocidad de los conversores A/D es otro factor que encarece o abarata el PLC.

- Salidas analógicas: pueden ser en tensión o corriente y debiendo tener protección contra cortocircuito para garantizar la integridad del módulo frente a sobrecargas ocasionales. La resolución y velocidad de los conversores D/A influye sobre el precio final del PLC. Este tipo de salidas se utiliza para excitar mandos analógicos.
- Módulos software: existen módulos, normalmente software en ROM, que junto con el programa supervisor se encargan de realizar tareas comunes en aplicaciones típicas de automatización (contar, desplazar, temporizar, comparar, etc.). Con estos módulos se pretende evitar la tarea de programarlos de forma repetitiva por su excesiva utilización.
- Comunicaciones: a través de este módulo el PLC puede comunicarse con otros dispositivos como los equipos de programación, ordenadores personales o con otros autómatas, con el fin de realizar controles más complejos.

3.3. Software

Por la organización hardware del PLC, estructura típica de una arquitectura de Von Neuman o arquitectura de programa almacenado, el autómata necesitará para su funcionamiento, un software que estará dividido en una parte para el programa supervisor (sistema operativo) y una segunda parte para el programa de usuario, que contiene el algoritmo de control, y los datos que utilice.

La forma de ejecución de los programas es muy singular y propia de estos equipos, olvidando por completo la tradicional ejecución de los programas en los ordenadores personales. La forma de ejecución se puede clasificar en:

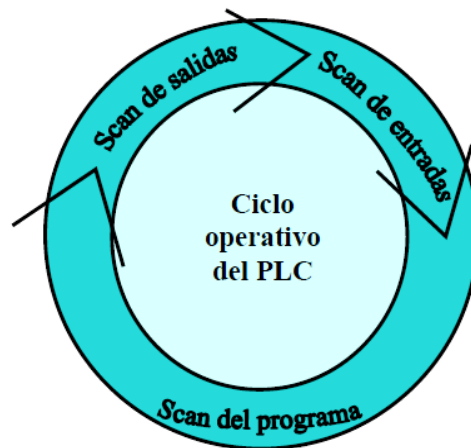
- Ejecución cíclica: es la más habitual. En primera instancia se ejecuta el programa supervisor, posteriormente el programa de usuario y así sucesivamente.
- Ejecución por interrupciones: una vez arrancada la ejecución, la evolución del programa responde a eventos hardware como las interrupciones.
- Ejecución por tiempo: una parte del programa se ejecuta durante un periodo de tiempo establecido; al final del mismo se desarrolla otra parte u otro programa.

Los PLCs en ejecución cíclica cumplen con un determinado ciclo de operaciones que consiste en leer las entradas, ejecutar todo el programa una vez, y actualizar las salidas tal como hayan resultado de la ejecución del programa. El tiempo empleado por el PLC para ejecutar un programa es lo que se conoce como tiempo de *scan*.

Los fabricantes de PLCs, especifican este tiempo de diversas formas, siendo las más comunes indicar el tiempo necesario para ejecutar una sola instrucción y un programa de la máxima longitud posible. Se debe tener en cuenta que, cuando se habla del tiempo de ejecución de una sola instrucción, este no es el mismo tiempo que el necesario para ejecutar un programa de una sola instrucción.

Esta aparente incoherencia se aclara recordando que un *scan* de programa incluye la lectura de las entradas, la actualización de las salidas y una serie de procesos internos que no son visibles al usuario. Por tanto, los elementos principales de un ciclo operativo son los representados en la figura 28.

Figura 28. Diagrama del ciclo de *scan* para ejecución cíclica



Fuente: <http://www.infoplcn.net/descargas/36-rockwell/313-iniciacion-a-la-programacion-de-un-plc-control-logix-5500>. Consulta: noviembre de 2011.

Se diferencian los siguientes pasos:

- El *scan* de entradas: durante un *scan* de entradas, el PLC examina los dispositivos de entrada externos para ver si tienen voltaje o no en sus entradas. El estado de las entradas se almacena temporalmente en un *buffer* de memoria de "imagen de entrada".
- El *scan* del programa: durante el *scan* del programa, el PLC analiza las instrucciones del programa, usa el estado de las entradas, y determina si

las salidas deben ser activadas o no. Los valores que deberán tener las salidas, los almacena en un *buffer* de salida dentro de la memoria.

- El *scan* de salidas. El PLC activa o desactiva sus circuitos de salida, según los valores almacenados en el *buffer* de salida, controlando así los dispositivos externos.

3.4. Configura del rack para PLC RSLogix5000

Ahora que ya se analizó sobre las principales generalidades de los PLC, de aquí en adelante se hará referencia sobre la plataforma de RSLogix5000; se trata de uno de los PLC de última generación de la familia Allen Bradley.

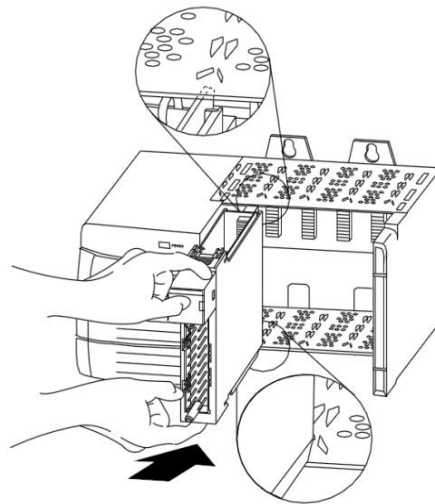
Se dará por sentado que el lector tiene conocimientos previos sobre programación de PLC de cualquier otra familia, específicamente programación en escalera, y sobre red de comunicación Ethernet.

Se empezará por definir el *rack* o chasis como análogo, al *mother board* de una computadora personal. Los diferentes *racks* que existen para Logix5000 ya traen incorporada la fuente de poder, y según la necesidad del proyecto, existen *racks* que tienen 4 slots para módulos de control, hasta de 17 slots.

Los módulos son tarjetas electrónicas que pueden ser de entrada y salida digital, entrada y salida análogas, de comunicación Ethernet, *Devicenet*, *Controlnet*, etc.

En la figura 29 se puede apreciar un *rack* de 4 *slots*; a la izquierda se puede apreciar la fuente de poder, y también se indica la manera en que debe de ser insertado un módulo o tarjeta a un *slot*.

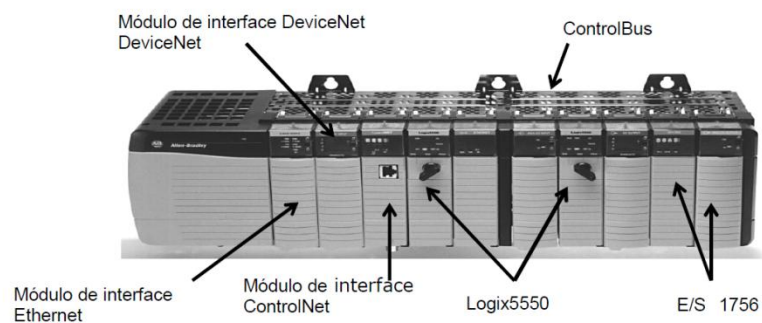
Figura 29. **Chasis para Logix5000 de 4 slots**



Fuente: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1756-in053_-en-p.pdf. Consulta: noviembre de 2011.

En la figura 30 se aprecia un chasis para Logix5000, completamente armado con varias tarjetas.

Figura 30. **Chasis de 10 slots para Logix5000**

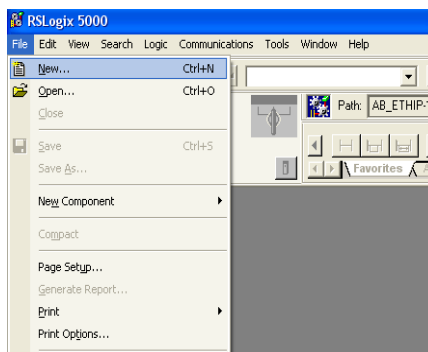


Fuente: <http://www.infoplc.net/descargas/36-rockwell/313-iniciacion-a-la-programacion-de-un-plc-control-logix-5500>. Consulta: noviembre de 2011.

3.4.1. Configuración de un nuevo chasis para Logix5000

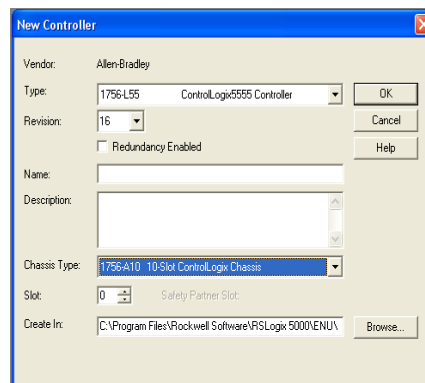
Para esto, desde el menú de programas de *Windows*, se ejecuta el *software* de Logix5000. Ya dentro se elige del menú *File* y se hace *click* en *new*, como se ve en la figura 31; después de esto aparecerá el menú de la figura 32.

Figura 31. Configuración de un nuevo proyecto



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Figura 32. Menú de configuración del chasis

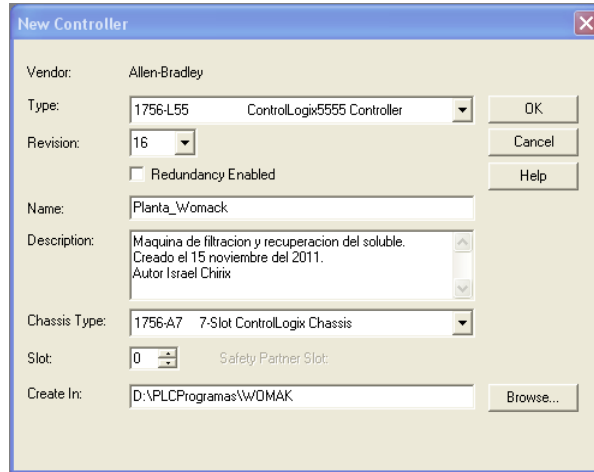


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Se empezará ahora a describir cada una de las opciones de este cuadro de diálogo.

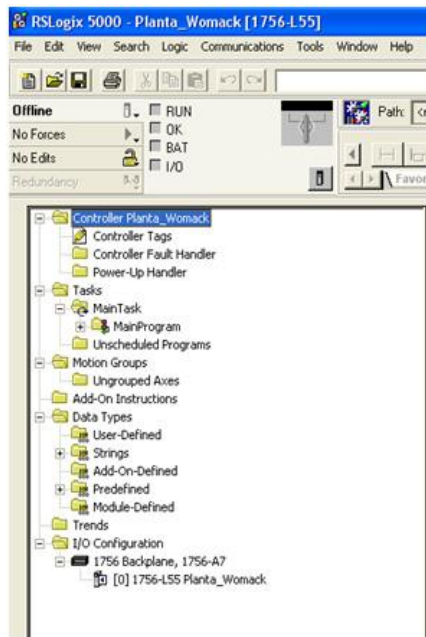
- *Type*: aquí se elige el tipo de procesador; para este caso se eligió el 1756-L55
- *Revision*: se refiere a la versión de *firmware*; se dejará en 16.
- *Redundancy enabled*: habilita la redundancia si el procesador elegido lo soporta.
- *Name*: será el nombre que llevará y distinguirá al controlador con todo y chasis, visto desde otro PLC si están en red, y con este nombre, se creará el programa principal que contendrá el PLC.
- *Description*: aquí se anotarán los detalles del proyecto, fecha autor y uso que tendrá el proyecto.
- *Chassis type*: se elige el chasis apropiado para el proyecto, según la necesidad de *slots* que se usarán. Para este caso, a modo de ejemplo, se elige el de 4 *slots*.
- *Slot*: aquí se define el *slot* donde irá insertado el CPU; puede ser cualquiera de los *slots*.
- *Create in*: se define la ruta donde se guardará el archivo del programa que se desarrollará.

Figura 33. **Controlador completamente configurado**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Figura 34. **Software del Logix5000, ya configurado**

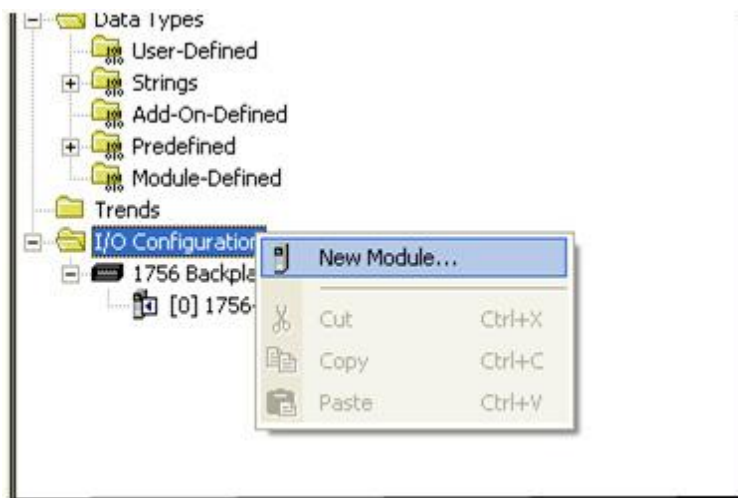


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Una vez se haya terminado de configurar, este cuadro de diálogo quedará como se muestra en la figura 33, para esta necesidad en particular. Ahora se hace *click* en *ok*, y todo el entorno del software de programación quedará como se muestra en la figura 34.

Ahora lo que resta es configurar los 9 slots restantes del chasis para indicarle la clase de tarjetas que contendrá cada una de ellas. Para esto se hará lo siguiente: se coloca el cursor del mouse sobre la carpeta *I/O configuration*, se le da *click* derecho y entonces muestra la opción de nuevo módulo, como se ve en la figura 35.

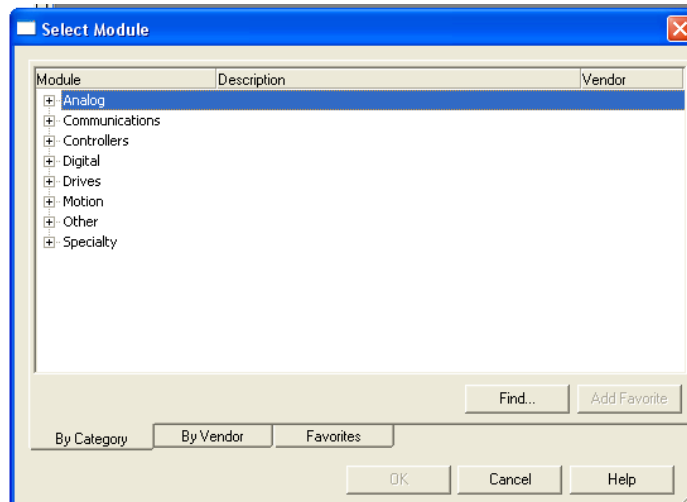
Figura 35. **Para asignar una nueva tarjeta a un slot, click en *new module***



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

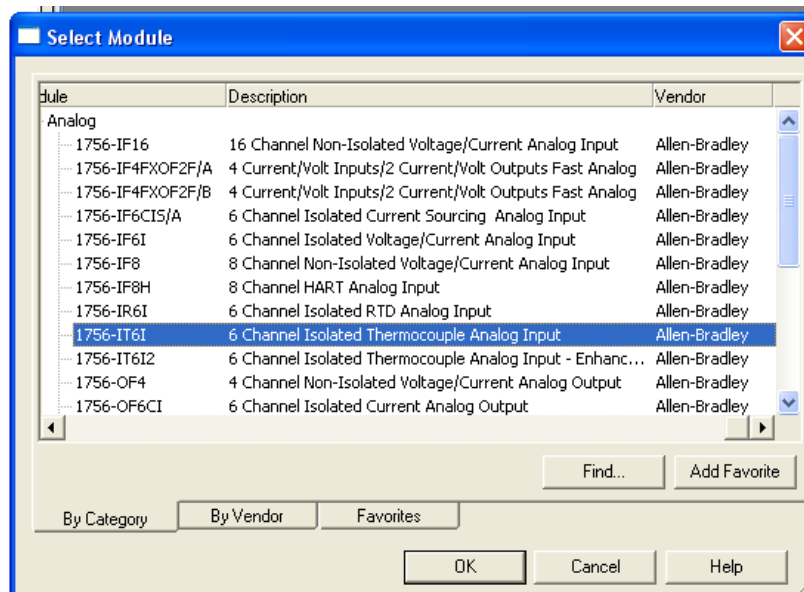
Inmediatamente aparecerá el cuadro de la figura 36, donde hay tres pestañas, por categoría, por fabricante y favoritos. Se puede ver que hay varios tipos de tarjetas que se pueden usar según la necesidad del proyecto.

Figura 36. Menú para agregar tarjetas de control



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Figura 37. Elección de tarjeta de control

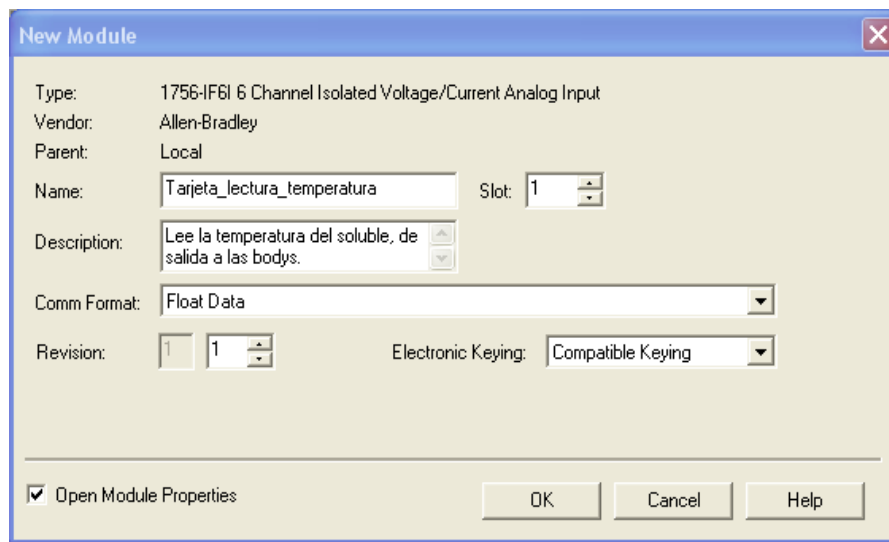


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

A modo de ejemplo se dará *click* en *analog*, y aparecerá un listado de tarjetas; se elige una de entrada análoga para el termopar de 6 canales, que es la 1756-IT6I (figura 37). Se hace click en *ok* y muestra el siguiente cuadro de diálogo de la figura 38.

Donde nuevamente se detalla, nombre de la tarjeta en particular; se define en qué *slot* irá conectado. Cabe hacer mención que los *slots* se numeran empezando de 0 hasta el último que esté disponible.

Figura 38. Configuración de la tarjeta de control



Fuente: Software programación, Envases de Centro América.

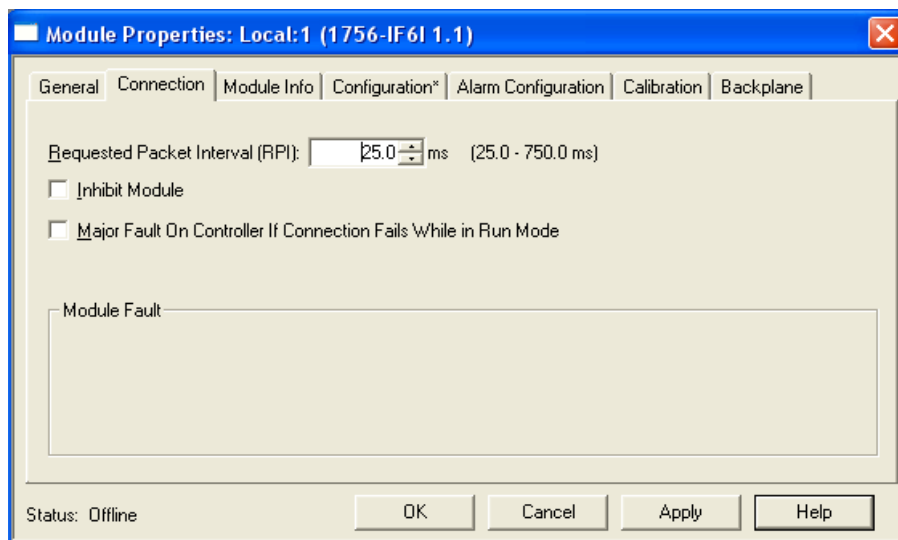
Para este caso se elige uno de 7 *slots*; entonces se tendrá disponible desde el *slot* 0 al slot 6. Se define también el tipo de dato que proporcionará; para este caso es tipo coma flotante por ser una entrada análoga, si se elige de tipo entero se truncarán los decimales.

Para la revisión, se usa la versión de *firmware* de la tarjeta y generalmente lo trae impreso a un costado; “*Electronic Keying*”, se refiere a compatibilidad, y *match* a que si en caso es necesario cambiar dicha tarjeta, deberá ser por una que sea exactamente de la misma revisión, se dejará en compatible.

Después de aceptar todo, aparecerá el siguiente cuadro de propiedades de la tarjeta en particular. Las propiedades más importantes para esta tarjeta serán el de conexión y configuración de los canales.

Para el caso de conexión RPI (*Requested Packet Interval*), es el periodo de tiempo que el procesador solicitará los datos a la tarjeta, el mínimo es de 25 milisegundos; se dejará en 25 milisegundos (figura 39).

Figura 39. **Propiedades de la tarjeta análoga**

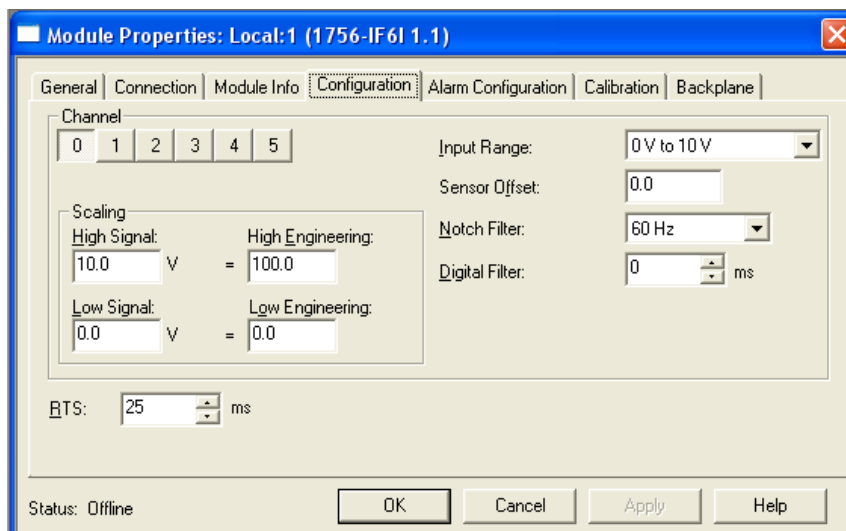


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Tocará ahora la configuración de canales; en este cuadro se elige el tipo de señal que puede ser voltaje o corriente. La señal de escalado se refiere a los valores proporcionales de temperatura que leerá la tarjeta en un rango que por lo general es de 0 a 10 voltios, o bien puede ser de 4-20 mA.

También se podrá asignar un valor de *offset* que se usa al momento de calibrar la temperatura para compensar variaciones leves a la entrada, debido a los sensores. RTS (*Real Time Sample Period*), se refiere al periodo de tiempo de muestreo que hace la tarjeta sobre los sensores de temperatura, debe ser igual al tiempo RPI, idealmente (ver figura 40).

Figura 40. **Configuración de la entrada análoga**

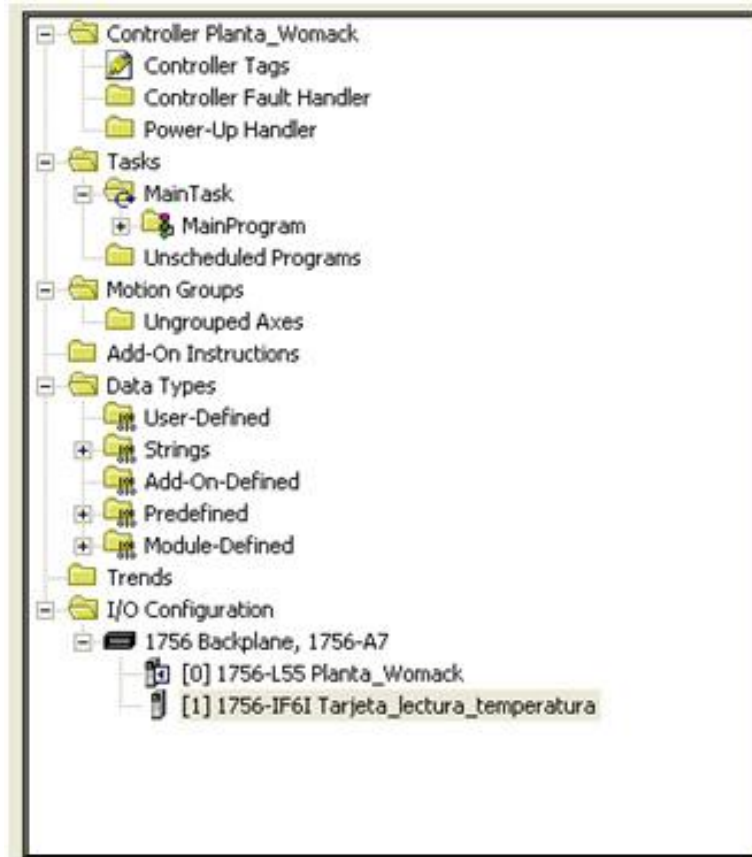


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Con todos estos valores puestos se da *click* a *ok*; ahora se verá el estado del chasis según las tarjetas asignadas (ver figura 41).

Se puede apreciar que en el chasis hay además del procesador una tarjeta de entradas análogas llamada tarjeta de lectura de temperatura (figura 41). Esto se repetirá para cada tarjeta que se necesite en el programa, hasta un máximo de 5 tarjetas, que son los *slots* que quedan libres, incluso se puede dejar un *slot* vacío y después ya con el proyecto ejecutándose, se puede agregar según la necesidad.

Figura 41. Vista del *rack* configurado

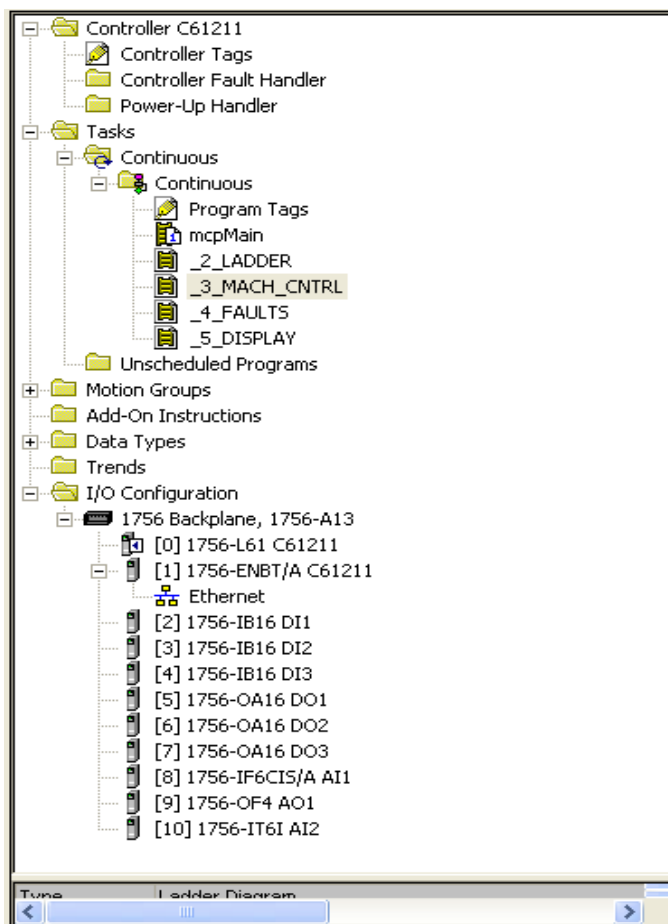


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Como detalle, por seguridad se dirá que todos estos cambios en las tarjetas y asignaciones se hacen fuera de línea, para evitar que la máquina tenga un comportamiento errático e imprevisible a la hora de reiniciar una nueva tarjeta.

Se puede ver en la figura 42, la configuración del chasis de la máquina del filtro Womack, donde se desarrollará el proyecto del control de temperatura del soluble.

Figura 42. **Configuración del chasis de la máquina Womack**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Como puede verse en la figura 42, en el *slot* 0 está el procesador, en el 1 hay una tarjeta de comunicación Ethernet, de la 2 a la 4 están las tarjetas de entradas digitales; de la 5 a 7, son tarjetas de salidas digitales. En el *slot* 8 hay una tarjeta de entrada análoga de corriente; en el *slot* 9 está una tarjeta de salida análoga de voltaje o corriente y en el 10, está la tarjeta de entrada análoga de lectura de los termopares, para la temperatura.

Se puede apreciar también que el fabricante no dio mayores detalles en cuanto al nombre del procesador, únicamente lo llamó C61211, que bien puede ser un código. Además se puede ver la carpeta de tareas (*task*, en inglés), donde residen los programas y diferentes rutinas que lo componen. Específicamente se trabajará con la rutina `_3_MATCH_CNTRL` y con la `_5_DISPLAY`.

3.5. Configuración de red Ethernet para Logix5000

Una vez el proyecto esté ejecutándose, es decir al haber terminado de automatizar el proceso que realiza la máquina, resulta importante compartir información entre las diferentes máquinas.

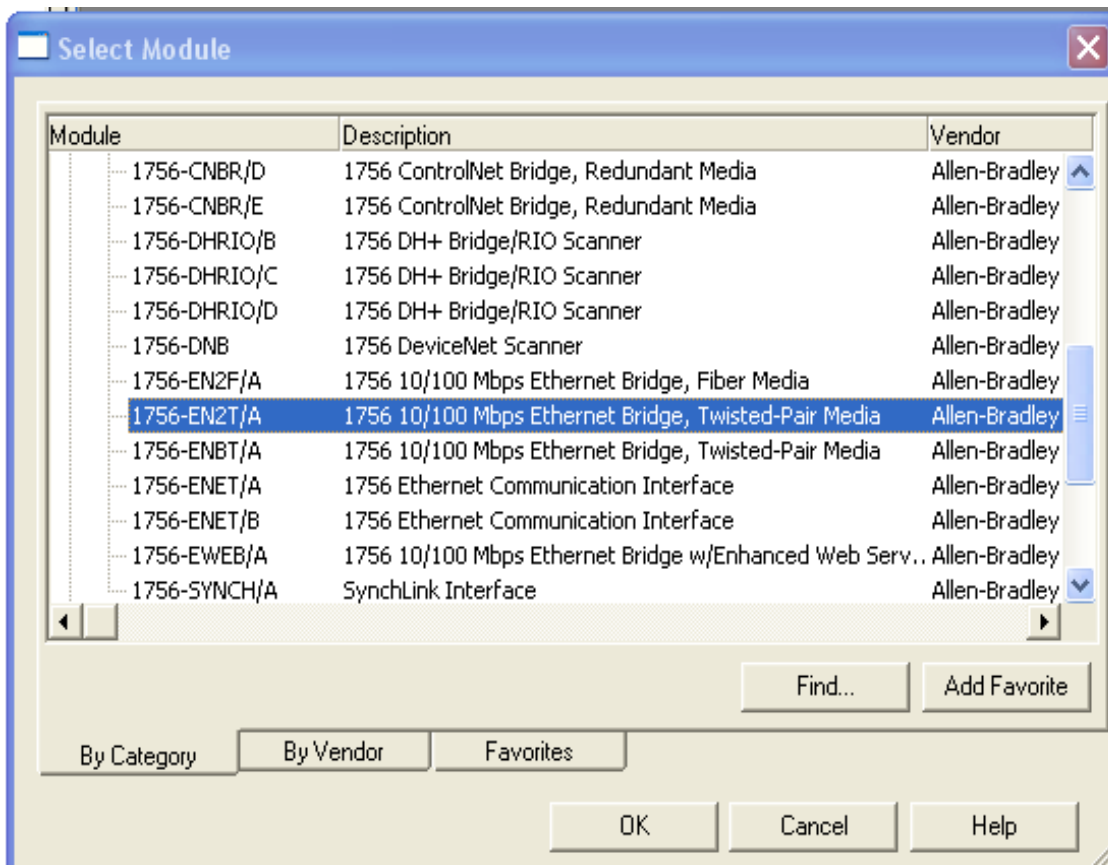
Más importante aún si de una máquina depende el proceso de la otra. Hay varias clases de redes, en este caso particular se enfocará en la red Ethernet.

Una vez configurada adecuadamente una tarjeta de comunicación Ethernet en el chasis de una máquina, podrán comunicarse con ella las demás máquinas para saber su estado, si está disponible o en falla, o simplemente para tomar valores de las lecturas de los sensores.

Se hará lo mismo de la sección anterior, colocar el cursor del *mouse* sobre la configuración del chasis del PLC.

Se elige nuevo módulo, ahora se hace *click* en comunicación y se busca el módulo de Ethernet Bridge, medio par trenzado, figura 43.

Figura 43. **Selección módulo de comunicación Ethernet**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Después de elegir el dispositivo, aparece la siguiente ventana, que deberá configurarse (figura 44).

Figura 44. Ventana principal de configuración del módulo de comunicación

The image shows a software window titled "New Module" with a blue header and a red close button. The window contains the following fields and controls:

- Type: 1756-EN2T/A 1756 10/100 Mbps Ethernet Bridge, Twisted-Pair Media (with a "Change Type..." button)
- Vendor: Allen-Bradley
- Parent: Local
- Name: [Empty text box]
- Description: [Empty text box with scroll arrows]
- Slot: 2 (with a spinner)
- Revision: 1 (with a spinner)
- Address / Host Name:
 - IP Address: [IP address input box]
 - Host Name: [Host name input box]
- Electronic Keying: Compatible Keying (with a dropdown arrow)

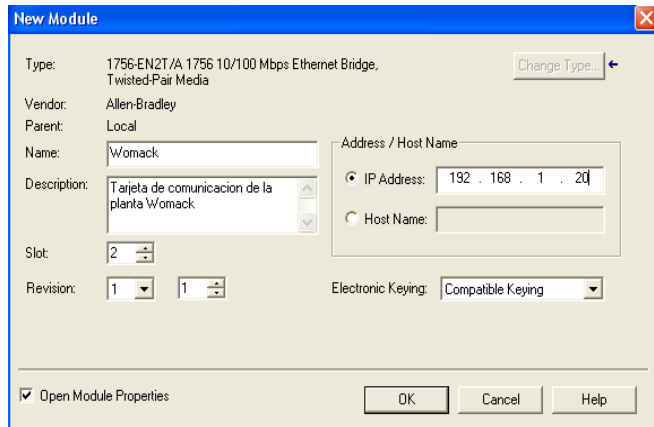
At the bottom, there is a checked checkbox for "Open Module Properties" and three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

En esta ventana, se pondrá el nombre y descripción de la tarjeta; y luego lo más importante, la dirección IP con la cual será vista en la red Ethernet. Esta dirección será única para dicho PLC y será con la que aparezca en la red; mediante la cual se tendrá acceso a dicho chasis, desde una computadora u otro PLC que necesite intercambiar información.

En *slot*, se elige en qué número de *slot* irá insertado el módulo; revisión es el número que trae impresa la tarjeta a un costado y se dejará la opción *electronic keying* como compatible. Luego de esto, la ventana quedará como indica la figura 45.

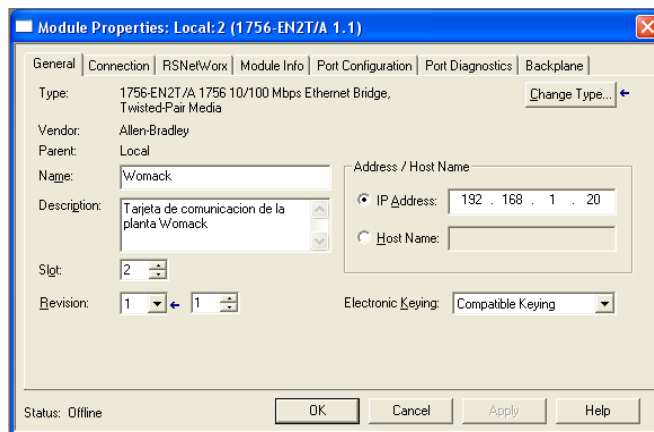
Figura 45. **Configuración de la tarjeta de comunicación Ethernet**



Fuente: Software programación, Envases de Centro América.

Se puede ver que se le asignó el nombre “Womack”, la dirección ip 192.168.1.20, se insertará en el slot 2 y es de revisión 1.1, con compatibilidad en revisión.

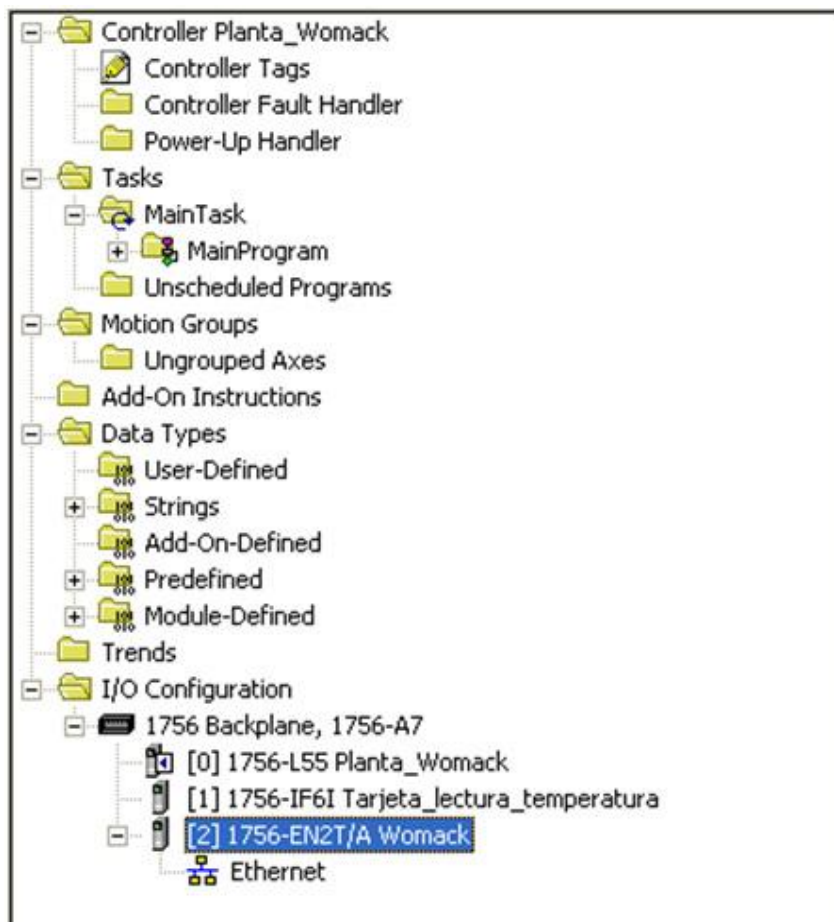
Figura 46. **Propiedades de la tarjeta de comunicación Ethernet**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Después de hacer click en ok aparecerá el siguiente cuadro (figura 46). En esta ventana se puede ver que aparecen más pestañas de configuración, que se dejarán sin cambios por no ser necesarios para el proyecto. Ahora se puede ver del lado izquierdo cómo quedó la nueva configuración del chasis, donde aparece ya la tarjeta de comunicación Ethernet (figura 47).

Figura 47. **Configuración terminada del chasis**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

3.6. Interfaz hombre-máquina (HMI)

La siglas HMI (*human machine interface*), corresponden a la abreviación en inglés de interfaz hombre-máquina. Los sistemas HMI son como una "ventana" del proceso.

Esta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador, empotrado en el panel de control de la máquina, o en una computadora. A los sistemas HMI en computadoras se les conoce también como *software* de monitoreo y control o de supervisión. Las señales del proceso son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida o redes de campo industrial Ethernet, por ejemplo.

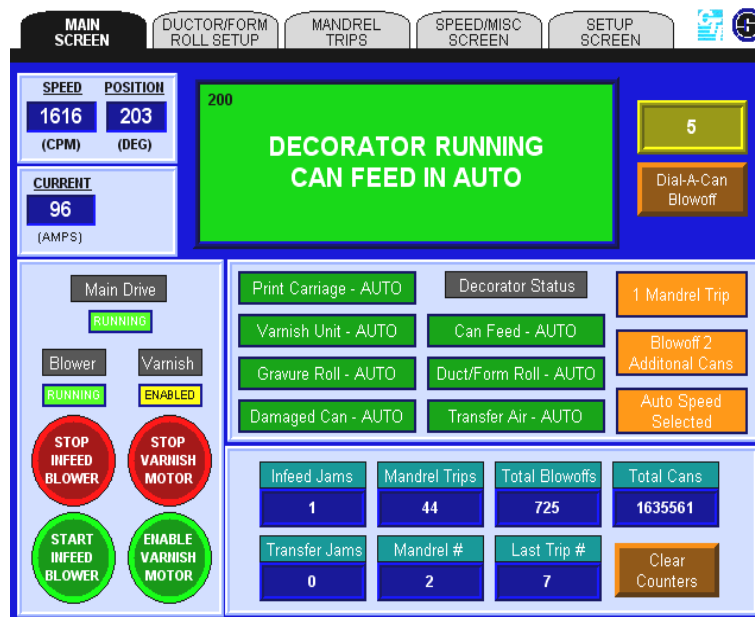
Estos dispositivos tienen uno o varios protocolos de comunicación entre ellos. El PLC gobierna todos los dispositivos, dígase motores, sensores, válvulas, etc. También registra los datos del proceso de la máquina como velocidad, temperatura, presión, posición etc. Para poder visualizar todos estos datos es necesario un medio visual que el operador común pueda ver y analizar sin tener mayor conocimiento de PLC; todo esto lo hace a través de la terminal HMI.

Una interfaz HMI, es un monitor LCD con interfaz de pantalla sensible al tacto y que va generalmente empotrado en una consola de operación o en una de las puertas del panel, y que mediante una red Ethernet u otro medio de comunicación, el PLC se comunica con ella enviando datos en tiempo real del proceso. Una vez configurado y programada la interfaz HMI, mostrará el estado general de operación de la máquina en tiempo real.

Como ejemplo, se puede mostrar la velocidad de los motores, tiempo de operación, presión, flujo de aire, temperatura, mensajes de fallas, mensajes de alarmas, y lo más importante, el historial de alarmas o fallas para su posterior análisis.

Una terminal HMI también puede trabajar como un medio de control de la máquina, por ejemplo a través de ella se puede activar o desactivar dispositivos, incluso desde ella apagar completamente la máquina.

Figura 48. **Interfaz HMI, mostrando información en tiempo real**



Fuente: Software programación, Envases de Centro América.

En la figura 48 puede observarse una de las muchas pantallas de una interfaz HMI, mostrando la velocidad de la máquina, el consumo de corriente del motor principal, la cantidad de botes producidos, hay botones para activar o desactivar motores y muestra el estatus general de la máquina.

Otro uso muy extendido de las interfaces HMI, es el de mostrar todo el proceso completo de producción. Es decir ya no solo mostrar una máquina en particular sino todo el conjunto de máquinas y transportes. A través de la interfaz, se puede ver el estado de cada máquina, y la velocidad de los transportes; al hacer *click* sobre una máquina en particular, mostrará el *status* de la máquina, y el tipo de falla si hay, para que pueda ser corregido en el menor tiempo posible para evitar paros prolongados en la línea.

En tiempo real se puede ver los números de producción junto con la merma en la producción, y tomar acciones inmediatas para reducir esta última.

Las funciones del software HMI son:

- **Monitoreo:** es la habilidad de obtener y mostrar datos de la planta en tiempo real. Estos datos se pueden mostrar como números, texto o gráficos, que permitan una lectura fácil de interpretar.
- **Supervisión:** esta función permite junto con el monitoreo la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso, directamente desde la computadora o terminal.
- **Alarmas:** es la capacidad de reconocer eventos excepcionales dentro del proceso y reportar estos eventos. Las alarmas son reportadas, basadas en límites de control preestablecidos.
- **Control:** es la capacidad de aplicar algoritmos que ajustan los valores del proceso y así mantener estos valores dentro de ciertos límites. El control va más allá del control de supervisión, removiendo la necesidad de la interacción humana. Sin embargo la aplicación de esta función desde un

software, corriendo en una PC, puede quedar limitada por la confiabilidad que quiera obtenerse del sistema.

- Históricos: es la capacidad de almacenar en archivos, datos del proceso a una determinada frecuencia. Este almacenamiento de datos es una poderosa herramienta para la optimización y corrección de procesos.

Las tareas de un software HMI de supervisión y control, son:

- Permitir una comunicación con dispositivos de campo.
- Actualizar una base de datos "dinámica" con las variables del proceso.
- Visualizar las variables mediante pantallas con objetos animados (mímicos).
- Permitir que el operador pueda enviar señales al proceso, mediante botones, controles *on/off*, ajustes continuos con el *mouse* o teclado.
- Supervisar niveles de alarma y alertar/actuar en caso de que las variables excedan los límites normales.
- Almacenar los valores de las variables para análisis estadístico y/o control.
- Controlar en forma limitada ciertas variables de proceso.

En el mercado industrial existen varias marcas de terminales HMI; aquí se hará el enfoque en la marca Allen Bradley y sus terminales *PanelView Plus*.

3.6.1. Tipos de terminales *PanelView Plus* (Allen-Branley)

PanelView Plus es una de las opciones de interface de operador más versátiles en la *suite* de soluciones de visualización. La familia de productos *PanelView Plus* proporciona una amplia gama de terminales de gran robustez que ofrecen:

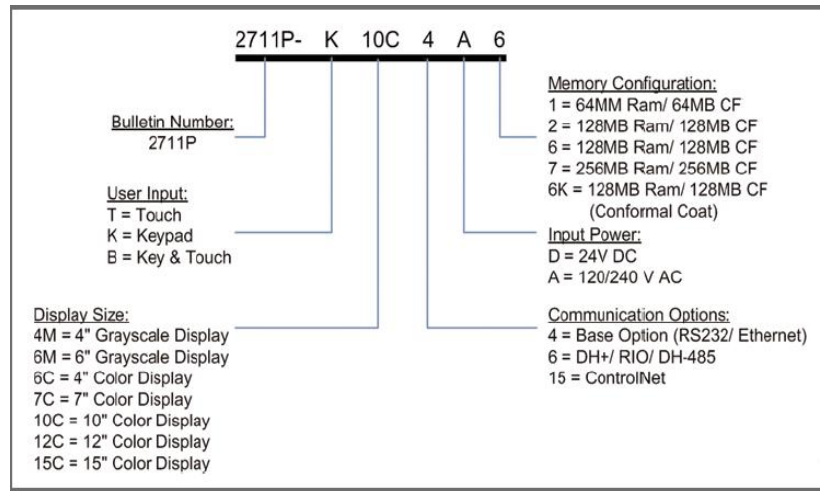
- Integración transparente en la arquitectura integrada
- Software de desarrollo común con capacidad de escalado
- Modularidad
- Comunicaciones de múltiples suministradores

El software “*FactoryTalk View Machine Edition*” viene instalado y activado para proporcionar integración transparente en su sistema de control, para ahorrar tiempo y coste. La mayoría de terminales *PanelView Plus* incluyen comunicaciones Ethernet/IP y RS232 de manera estándar para funcionar con todos los controladores Allen-Bradley. Módulos opcionales instalables en el campo proporcionan comunicaciones *ControlNet*, *DeviceNet*, DH+ y Profibus.

La familia *PanelView Plus* comienza con las terminales de escala de grises de 4 pulgadas con entrada de teclado, como la opción más pequeña y económica. Hay pantallas LCD a colores de mayor tamaño, hasta de 15 pulgadas, disponibles para ver más información en una sola pantalla o para permitir gráficos más grandes. La entrada opcionalmente puede realizarse con pantallas táctiles más pequeñas, más intuitivas, un teclado para mayor longevidad de la pantalla en entornos hostiles o una combinación de ambos.

La figura 49, muestra cómo el número de catálogo identifica a una terminal en particular.

Figura 49. **Identificación según el número de catálogo de una terminal**
PanelView Plus



Fuente: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/2711p-pp007_-es-p.pdf. Consulta: diciembre de 2011.

3.6.1.1. Terminales *PanelView Plus* 700 a 1500

Las terminales HMI *PanelView Plus* 700 ofrecen las siguientes características:

- Módulos de pantalla gráfica de color con teclado, pantalla *touch*, o teclado y soporte pantalla *touch* a la vez
- Pantalla sensible al tacto tipo resistivo
- Comunicación serial y Ethernet

- Compatibilidad de interface de comunicación modular, para facilitar intercambio de información.
- Módulos de expansión de memoria actualizables de 256/MB de RAM y 512/MB *Compact Flash*
- Fuente alimentación, AC (85...264V AC) o DC (18...32V DC)
- Soporte para tarjetas Compact Flash tipo 1
- Puertos USB que dan conexión para teclado, mouse e impresoras

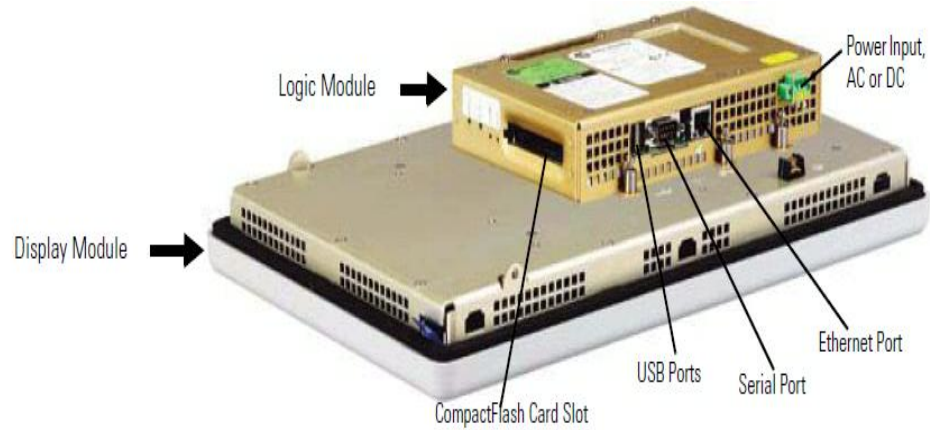
3.6.1.2. Componentes modulares

Las terminales que usan componentes modulares permiten flexibilidad en la configuración, instalación y actualización. Se ordena según las necesidades del usuario; se puede ver en la figura 50, una terminal anteriormente descrita.

Las pantallas están fabricadas para proporcionar alto contraste y brillo para instalaciones exteriores; las pantallas 1250 y 1500 traen integrado una capa de antirreflejo.

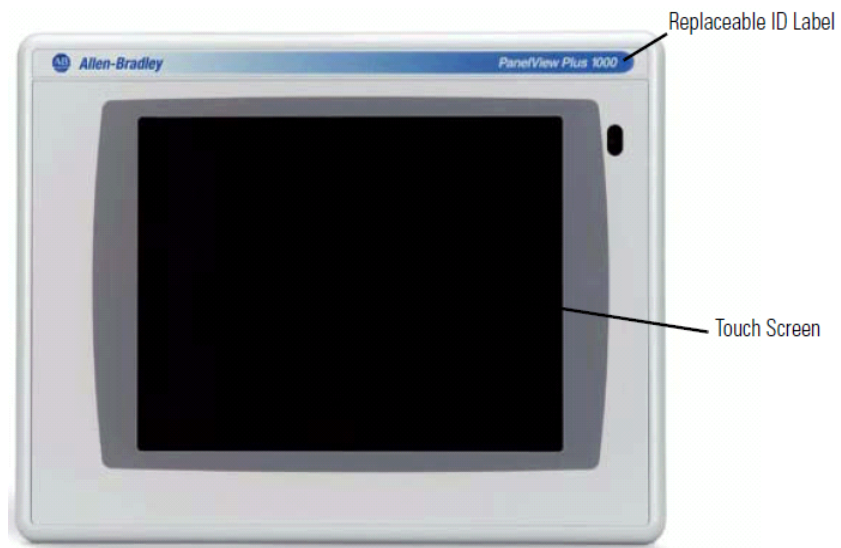
Todas tienen las mismas características y *firmware*, dando así fácil migración a pantallas más grandes. Las pantallas táctiles son resistivas análogas, de diferentes tamaño (ver figura 51).

Figura 50. Componentes modulares de una terminal *PanelView Plus*



Fuente: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/2711p-um001_-en-p.pdf. Consulta: diciembre de 2011.

Figura 51. Pantalla táctil



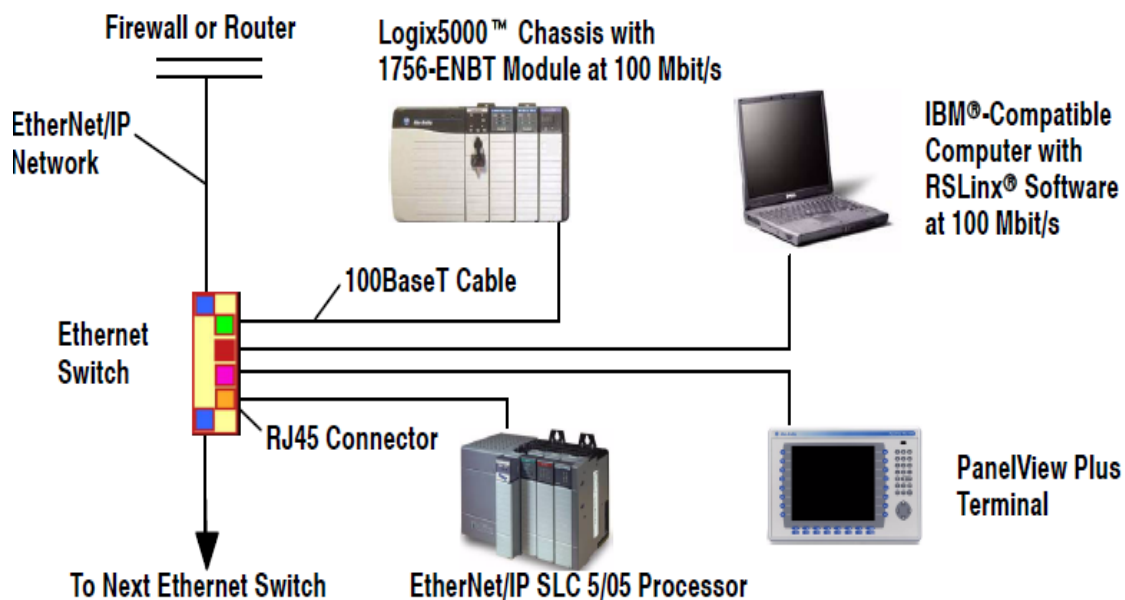
Fuente: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/2711p-um001_-en-p.pdf. Consulta: diciembre de 2011.

3.6.2. Configuración de *PanelView Plus*

Ahora se verá la configuración de comunicación de una terminal HMI en una red EtherNet/IP, por lo que se centrará específicamente en este protocolo de comunicación.

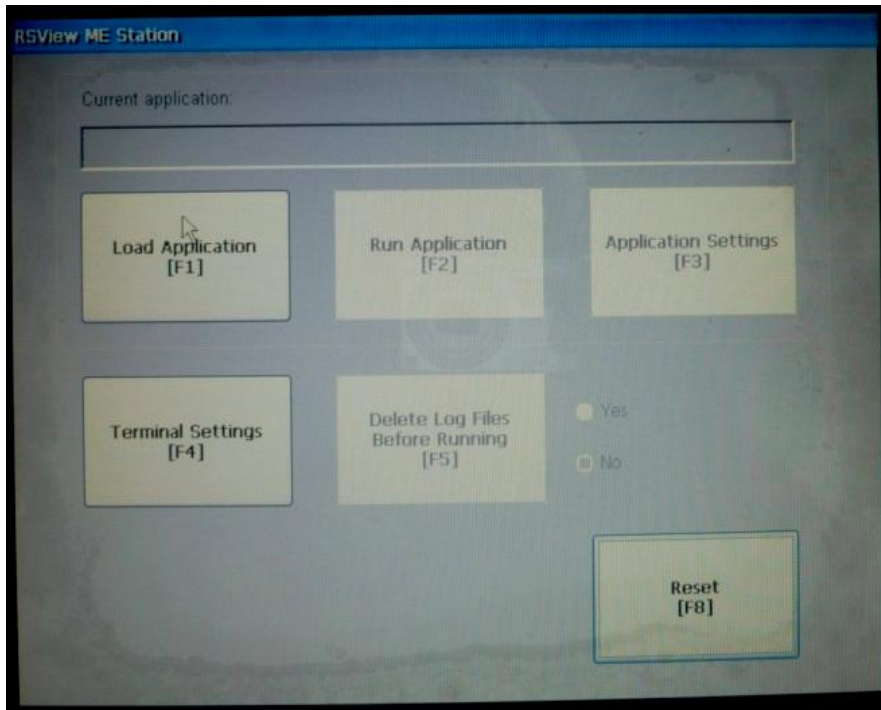
En la figura 52 se puede ver la estructura de una red EtherNet/IP, en la cual existe una terminal *PanelView Plus* trabajando.

Figura 52. ***PanelView Plus*** en una red **Ethernet/IP**



Fuente: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/2711p-um001_-en-p.pdf. Consulta: diciembre de 2011.

Figura 53. **Pantalla inicial de configuración**



Fuente: Terminal HMI, Envases de Centro América.

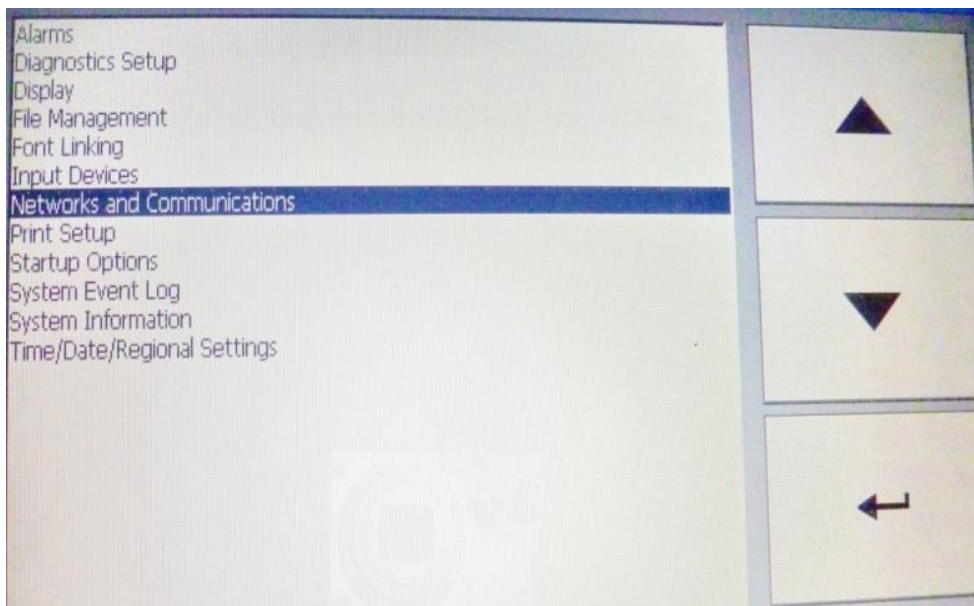
Al energizar la terminal, una vez haya completado su prueba de arranque, la pantalla inicial será el de modo configuración. En esta existen 2 botones; uno que hace referencia a la carga de una aplicación existente y otro que permite configurar directamente el *PanelView Plus*, al presionar sobre el botón “*Terminal Settings*” (ver figura 53). La pantalla principal de configuración ofrece varias opciones al usuario; dependiendo del status de la terminal, el usuario puede hacer lo siguiente desde este menú.

- Cargar una aplicación
- Ejecutar una aplicación
- Configurar o ver los estados de la aplicación

- Configurar o ver los estados de la terminal
- Reiniciar la terminal

Antes de ejecutar una aplicación en una terminal nueva, lo primero que debe de hacer es configurar la red de comunicación, para este caso una red Ethernet/IP. Algunas redes automáticamente asignan una dirección IP si está establecido el servidor DHCP; para este caso se hará manualmente, asignando una dirección IP, (ver figura 54).

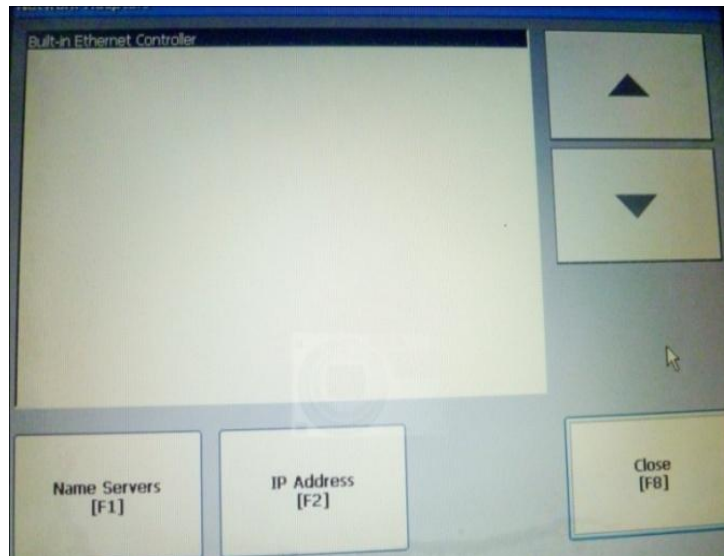
Figura 54. **Opciones de configuración de la terminal**



Fuente: Terminal HMI, Envases de Centro América.

En la figura 55 se puede ver la pantalla después de haberse elegido la opción de “*Network and Communication*”. Esta llevará directamente a establecer la dirección IP, de la terminal.

Figura 55. **Configuración de red Ethernet/IP**



Fuente: Terminal HMI, Envases de Centro América.

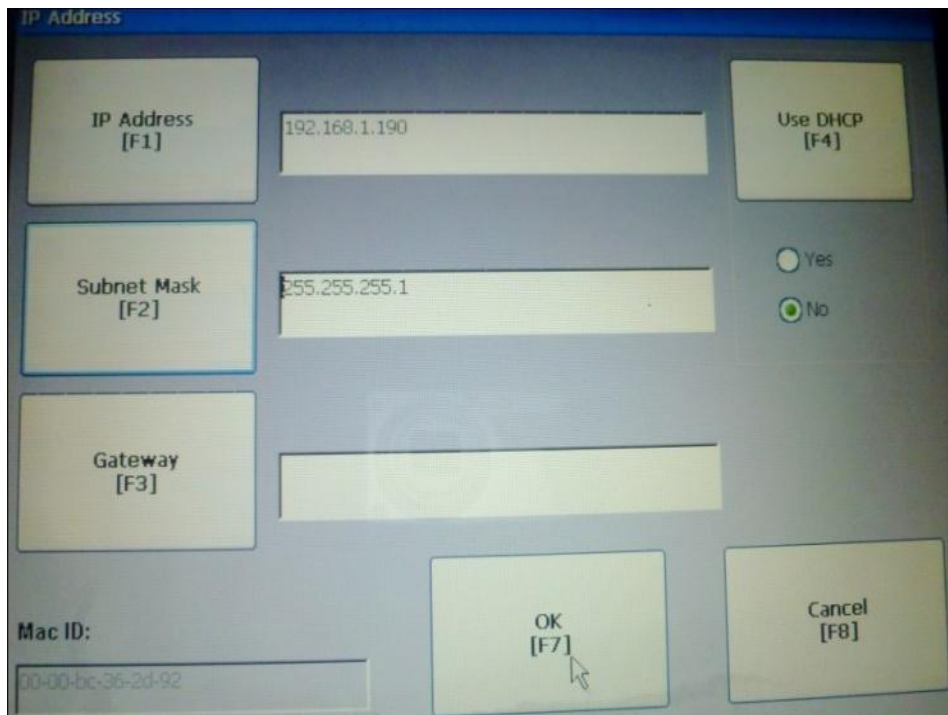
Se elige “*IP Address*”, y aparecerá la siguiente pantalla (figura 56); aquí es donde directamente se asigna la dirección IP, que el administrador de la red proporcione. Con esta dirección asignada y después de reiniciar la terminal, se podrá ejecutar la aplicación de pantalla, sabiendo a qué dirección solicitar los datos a ser mostrados.

Las demás opciones de configuración, como se puede ver en la figura 54, no son más que colocar fecha y habilitar permisos; existe además un gestor de archivos de aplicaciones que puede tener en memoria la terminal.

De estos archivos de aplicaciones, solo uno se ejecuta a la vez; con el gestor se pueden hacer copias de los archivos, eliminar de la terminal o elegir cargar y ejecutar una aplicación según la necesidad del trabajo.

Las demás opciones son básicas de personalización de la terminal, para el usuario con experiencia básica en configuración de *hardware* no deberá presentar complicaciones.

Figura 56. **Asignación de la dirección IP y máscara de subred**



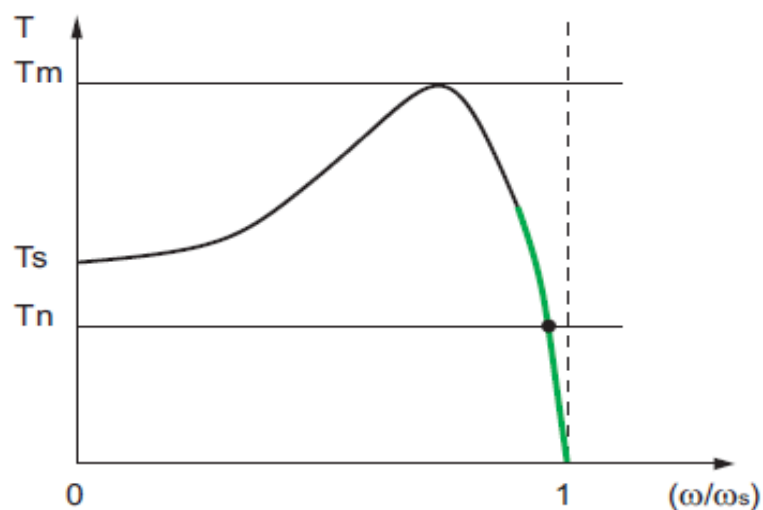
Fuente: Terminal HMI, Envases de Centro América.

4. VARIADORES DE FRECUENCIA

Un variador de frecuencia (siglas VFD, del inglés: *variable frequency drive* o bien AFD *adjustable frequency drive*) es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como *drivers* de frecuencia ajustable (AFD), *drivers* de CA, *microdrivers* o inversores. Dado que el voltaje es variado, a la vez que la frecuencia, a veces son llamados *drivers* VVVF (variador de voltaje variador de frecuencia).

Figura 57. **Diagrama par versus velocidad de un motor alimentado en directo**



Fuente: SCHONEK, Jackes. Protección BT y variadores de velocidad. p. 7.

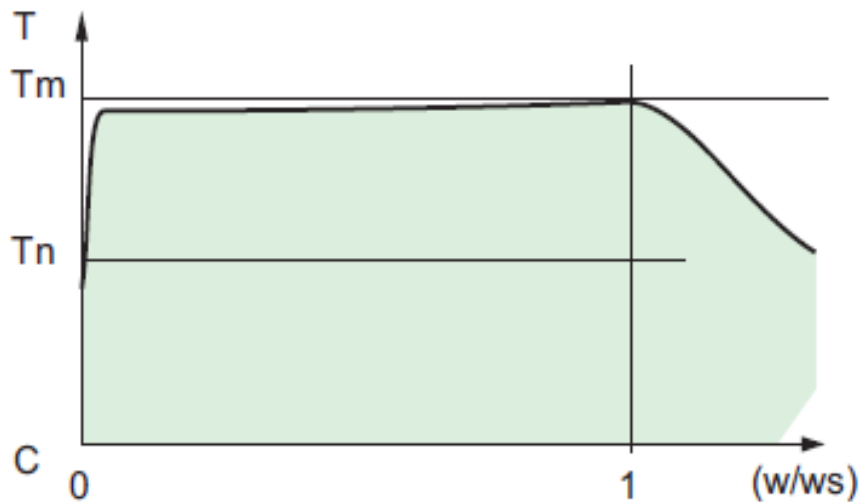
El objetivo de los variadores de velocidad es alimentar a los motores asíncronos trifásicos para conseguir características de funcionamiento radicalmente diferentes a las de su utilización normal, a amplitud y frecuencia constantes. La tabla I presenta las ventajas de estos dispositivos.

Tabla I. **Comparación de las ventajas del uso de un VFD**

Motor asíncrono	En uso normal	Usando un VFD
Corriente de arranque	Muy elevada, del orden de 6 a 8 veces la corriente nominal en valor eficaz, 12-20 veces en valor de cresta.	Limitado en el motor (en general: cerca de 1.5 veces la corriente nominal).
Par de arranque C_d	Elevado y no controlado, del orden de 2 a 3 veces el par nominal C_n .	Del orden de 1.5 veces el par nominal C_n y controlado durante la aceleración.
Arranque	Brutal, cuya duración solo depende de las características del motor y de la carga arrastrada, por resistencia, inercia.	Progresivo, sin brusquedades y controlado (rampa lineal de velocidad, por ejemplo).
Velocidad	Variado ligeramente según la carga, próxima de la velocidad de sincronismo N_s .	Variable, posible a partir de cero hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo N_s .
Par máximo C_m	Elevado, del orden de 2 a 3 veces el par nominal C_n .	Elevado disponible para todo el rango de velocidades, del orden de 1.5 veces el par nominal.
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema particular.	Fácil
Inversión del sentido de marcha	Fácil solamente después de parada del motor.	Fácil
Riesgo de bloqueo	Sí, en caso de exceso de par, par resistente $> C_m$, o en caso de bajada de tensión.	No
Funcionamiento del motor en el plano par versus velocidad	Figura 57.	Figura 58.

Fuente: SCHONEK, Jackes. Protección BT y variadores de velocidad. p. 6.

Figura 58. **Diagrama par versus velocidad de un motor alimentado por convertidor de frecuencia**



Fuente: SCHONEK, Jackes. Protección BT y variadores de velocidad. p. 7.

4.1. Principio de operación

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:

$$RPM = \frac{120 \times f}{p} \quad (\text{Ec. 3})$$

De donde:

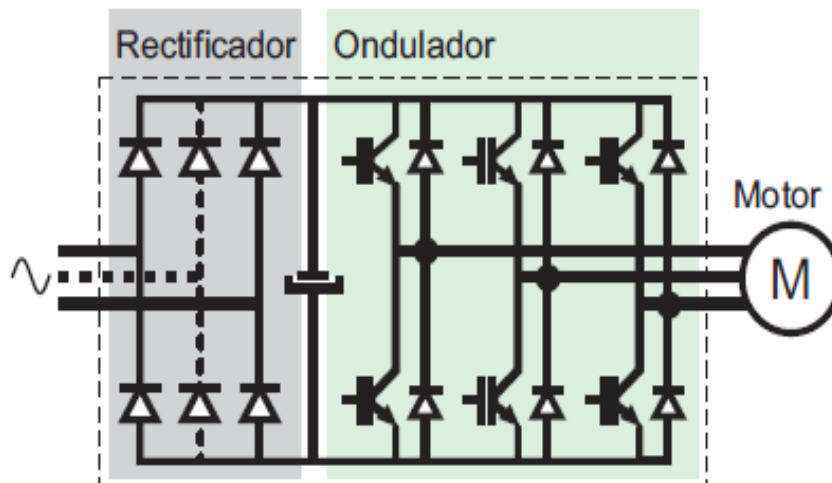
RPM = revoluciones por minuto

f = frecuencia de suministro en hertz

p = número de polos

De lo anterior, todo consiste en suministrar al motor una onda de tensión a amplitud y frecuencia variables, manteniendo la relación tensión/frecuencia sensiblemente constante. La generación de esta onda de tensión la realiza un dispositivo electrónico de potencia, cuyo esquema de principio está ilustrado en la figura 59.

Figura 59. **Esquema de principio de un convertidor de frecuencia**



Fuente: SCHONEK, Jackes. Protección BT y variadores de velocidad. p. 7.

Las características del motor CA 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 debe ser regulada en un valor constante ($460/60 = 7.67$ V/Hz en este caso).

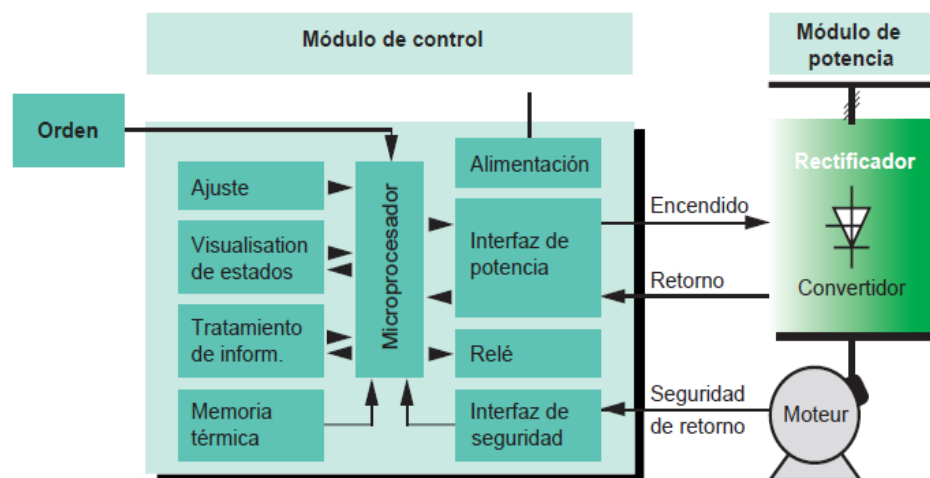
Para un funcionamiento óptimo, otros ajustes de voltaje son necesarios, pero nominalmente la constante V/Hz es la regla general.

4.2. Estructura del variador de frecuencia

Los variadores electrónicos de velocidad se componen de dos módulos generalmente montados en una misma envoltura (figura 60).

- Un módulo de control que controla el funcionamiento del aparato
- Un módulo de potencia que alimenta el motor con energía eléctrica.

Figura 60. Estructura general interna de un variador de velocidad



Fuente: CLENET, Daniel. Arrancadores y variadores de velocidad. p. 11.

4.2.1. El módulo de control

En los arrancadores y variadores modernos, todas las funciones se controlan mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas como la velocidad, la corriente, etc.

Las capacidades de cálculo de los microprocesadores, así como de los circuitos dedicados (ASIC) han permitido diseñar algoritmos de mando con excelentes prestaciones y en particular, el reconocimiento de los parámetros de la máquina arrastrada.

A partir de estas informaciones, el microprocesador gestiona las rampas de aceleración y deceleración, el control de la velocidad y la limitación de corriente, generando las señales de control de los componentes de potencia. Las protecciones y la seguridad son procesadas por circuitos especializados (ASIC) o están integradas en los módulos de potencia (IPM).

Los límites de velocidad, las rampas, los límites de corriente y otros datos de configuración, se definen usando un teclado integrado o mediante PLC (sobre buses de campo) o mediante PC.

Del mismo modo, los diferentes comandos (marcha, parada, y frenado), pueden proporcionarse desde interfaces de diálogo hombre-máquina, utilizando un PLC o PC.

Los parámetros de funcionamiento y las informaciones de alarma, y los defectos pueden verse mediante *displays*, diodos LED, visualizadores de segmentos o de cristal líquido o pueden enviarse hacia la supervisión (HMI), mediante un protocolo de comunicación.

Las tensiones necesarias para el conjunto de circuitos de medida y de control son proporcionadas por una alimentación integrada en el variador, y separadas galvánicamente de la red.

4.2.2. El módulo de potencia

El módulo de potencia está principalmente constituido por:

- Componentes de potencia (diodos, tiristores, IGBT...)
- Interfaces de medida de las tensiones y/o corrientes
- Frecuentemente de un sistema de ventilación

El circuito de potencia está constituido por un rectificador y un ondulator, que a partir de la tensión rectificada, produce una tensión de amplitud y frecuencia variables (figura 60). El rectificador consta generalmente de un puente rectificador de diodos y de un circuito de filtro constituido por uno o varios condensadores en función de la potencia. Al conectar el variador, un circuito limitador controla la intensidad.

Ciertos convertidores utilizan un puente de tiristores para limitar la corriente de carga de los condensadores de filtro, que se cargan con una tensión de un valor sensiblemente igual al valor de pico de la senoide de red (alrededor de 560 V en una red trifásica de 400 V). El puente ondulator, conectado a estos condensadores, utiliza 6 semiconductores de potencia, normalmente del tipo IGBT y diodos asociados.

4.2.3. La variación de velocidad

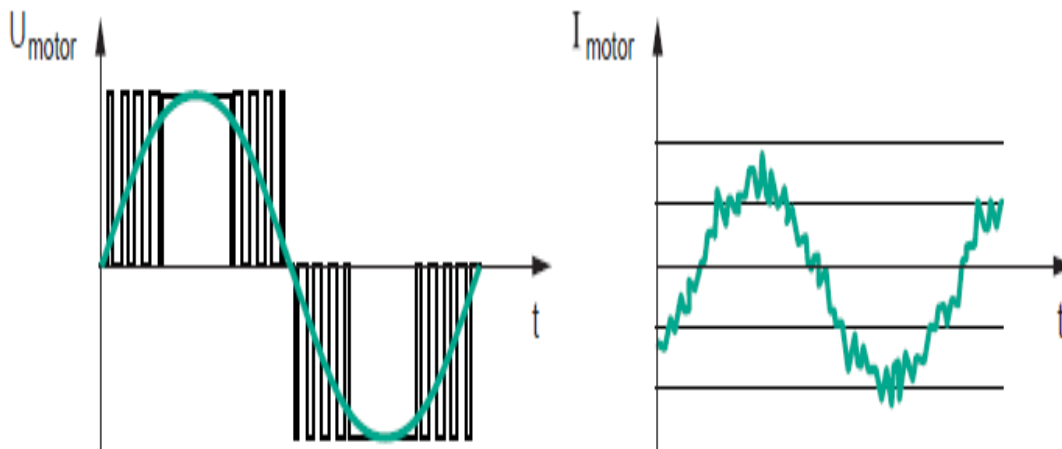
La generación de la tensión de salida se obtiene por corte de la tensión rectificada por medio de impulsos cuya duración o anchura, se modula de manera que la corriente alterna resultante sea lo más senoidal posible.

Esta técnica, conocida bajo el nombre de PWM (*pulse width modulation*, en español modulación de ancho de pulso), que se ve en la figura 61, condiciona la rotación regular a baja velocidad y limita los calentamientos.

La frecuencia de modulación que se aplica debe de ser suficientemente elevada para reducir el rizado de corriente y el ruido acústico en el motor, pero sin que aumenten sensiblemente las pérdidas en el puente ondulador y en los semiconductores.

La aceleración y la deceleración se regulan mediante dos rampas.

Figura 61. **La modulación de ancho de pulso**



Fuente: CLENET, Daniel. Arrancadores y variadores de velocidad. p. 18.

4.2.4. Modos de control

Básicamente hay dos tipos de control de los convertidores electrónicos: el escalar y el vectorial.

4.2.4.1. El control escalar

El control escalar está basado en el concepto original del convertidor de frecuencia: impone en el motor una determinada tensión/frecuencia, tratando de mantener la relación V/f constante, o sea, el motor trabaja con flujo aproximadamente constante. Es aplicado cuando no hay necesidad de respuestas rápidas a comandos de par y velocidad y es particularmente interesante cuando hay conexión de múltiples motores a un único convertidor.

El control es realizado en circuito abierto y la precisión de la velocidad es función del deslizamiento del motor, que varía en función de la carga, ya que la frecuencia en el estator es impuesta.

Para mejorar el desempeño del motor en las bajas velocidades, algunos convertidores poseen funciones especiales como la compensación de deslizamiento (que atenúa la variación de la velocidad en función de la carga) y el *boost* de tensión (aumento de la relación V/f para compensar el efecto de la caída de tensión en la resistencia estática), de manera que la capacidad de par del motor sea mantenida.

El control escalar es lo más utilizado debido a su simplicidad y debido al factor de que la gran mayoría de las aplicaciones no requiere alta precisión y/o rapidez en el control de la velocidad.

4.2.4.2. El control vectorial

El control vectorial posibilita mantener un elevado grado de precisión y rapidez en el control del par y de la velocidad del motor.

El control descompone la corriente del motor en dos vectores: uno que produce el flujo de magnetización y otro que produce un par, regulando separadamente el par y el flujo.

El control vectorial puede ser realizado en circuito abierto (“*sensorless*”) o en circuito cerrado (con realimentación).

- Con sensor de velocidad, requiere la instalación de un sensor de velocidad (por ejemplo, un *encoder* incremental) en el motor. Este tipo de control permite la mayor precisión posible en el control de la velocidad y del par, inclusive en la rotación nula.
- *Sensorless*, es más simple que el control con sensor, pero presenta limitaciones de par principalmente en bajísimas rotaciones. En velocidades más elevadas es prácticamente tan bueno como el control vectorial con realimentación.

Las principales diferencias entre los dos tipos de control son que el control escalar solo considera las amplitudes de las magnitudes eléctricas instantáneas (flujos, corrientes y tensiones), refiriéndolas al estator, y su cálculo está basado en el circuito equivalente del motor, o sea, son ecuaciones de régimen permanente.

El control vectorial admite la representación de las magnitudes eléctricas instantáneas por vectores, basado en las ecuaciones espaciales dinámicas de la máquina, con las magnitudes referidas al flujo enlazado por el rotor; o sea, el motor de inducción es visto por el control vectorial como un motor de corriente continua, habiendo regulación independiente para par y flujo.

4.2.5. Interacción entre red y convertidor

El sistema (motor + convertidor de frecuencia) es visto por la fuente de alimentación como una carga no lineal, cuya corriente posee armónicas (componentes de frecuencias múltiplos de frecuencia de la red). De manera general, se considera que el rectificador produce armónicas características de orden $h = np \pm 1$ en el lado ca, o sea, en la red (p es el número de pulsos del convertidor y $n = 1, 2, 3$).

4.2.5.1. Componentes armónicos

Así, en caso del puente rectificador con 6 diodos (6 pulsos), las principales armónicas generadas son la 5ª y la 7ª, cuyas amplitudes pueden variar de 10% a 40% de la fundamental, dependiendo de la impedancia de red. Para 12 pulsos (12 diodos) las armónicas más expresivas son la 11ª y la 13ª. Las armónicas superiores generalmente poseen menor amplitud y son más fáciles de filtrar.

El parámetro que demuestra cómo las armónicas pueden causar distorsión en la red es el THD (distorsión armónica total), suministrado por el fabricante del convertidor y definido como:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_h}{A_1} \right)^2} \quad (\text{Ec. 4})$$

- A_h son los valores eficaces de las componentes armónicas
- A_1 es el valor eficaz de la componente fundamental

4.2.5.2. Reactancia de red / inductor en el *link* DC

Las corrientes armónicas que circulan por las impedancias de la red de alimentación y que dependen de los valores de las impedancias presentes en el circuito de entrada/salida del rectificador, causan caídas de tensión armónicas, distorsionando la tensión de alimentación del propio convertidor o de otros equipamientos conectados a la red.

Estas distorsiones armónicas de corriente y tensión pueden ocasionar un bajo factor de potencia, además de aumentar las pérdidas eléctricas en las instalaciones con sobrecalentamiento de componentes tales como cables, transformadores, motores, bancos de capacitores, etc.

Para reducir el contenido armónico de la corriente y aumentar el factor de potencia, puede ser instalada una inductancia en la entrada y/o en el *link* DC del convertidor.

El inductor en el *link* DC tiene la ventaja de no introducir caída de tensión, pero, dependiendo de la combinación de su valor con los valores de impedancia de la red y capacitancia del *link* DC, puede resultar en resonancias indeseadas con el sistema.

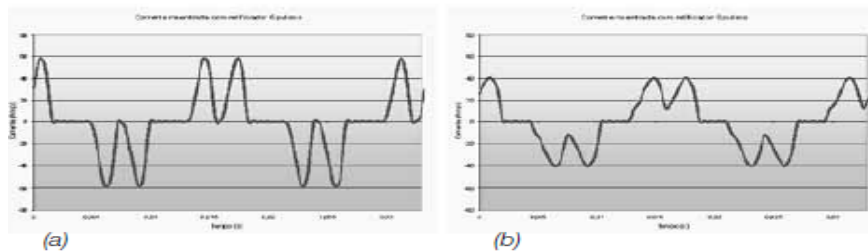
La reactancia de red, por otro lado, disminuye la tensión mediana del circuito intermedio (comparada aquella obtenida sin reactancia), pero es más eficaz en la reducción de eventuales transientes de sobretensión de la red, además de reducir la corriente eficaz en los diodos del rectificador y el *ripple* de corriente en los capacitores del circuito intermedio, aumentando la vida útil de los semiconductores y del banco de capacitores constituyentes del *link* DC.

En la figura 62 se pueden ver las formas de onda de tensión y corriente en la entrada del convertidor sin (a) y con (b) reactancia de red. Se puede verificar que la reactancia de red suaviza los picos (reduce, por tanto, el contenido armónico) y disminuye el valor eficaz de corriente en la entrada, causando también disminución de la distorsión de la tensión en la entrada del convertidor.

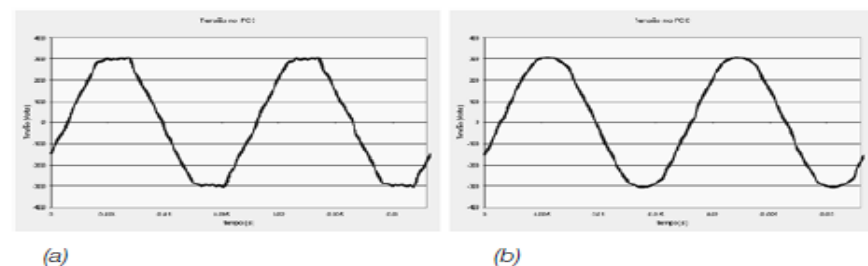
Para evitar daños, al convertidor debe tener una impedancia mínima de red que proporcione una caída de tensión porcentual de 1 a 2%, dependiendo del tamaño del convertidor de frecuencia, para la corriente nominal del convertidor.

Figura 62. **Formas de onda de tensión y corriente e la entrada del VFD**

Corriente en la entrada del convertidor



Tensión en la entrada del convertidor



Fuente: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-induccion-alimentados-por-convertidores-de-velocidad-pwm-029-articulo-tecnico-espanol.pdf>. Consulta: enero de 2012.

Como criterio de uso, se debe considerar que una reactancia de red que presenta una caída de tensión porcentual de 2 a 4% (para la corriente nominal del convertidor de frecuencia) resulta en un buen compromiso entre la caída de tensión en el motor, la mejoría del factor de potencia y la reducción de la distorsión armónica de la corriente.

El valor de reactancia de red necesaria para que se obtenga la caída de tensión porcentual deseada, puede ser calculado de la siguiente manera:

$$L = \frac{\text{caída} \cdot \text{tensión} \% V_{red}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi f_{red} I_{nominal}} H \quad (\text{Ec. 5})$$

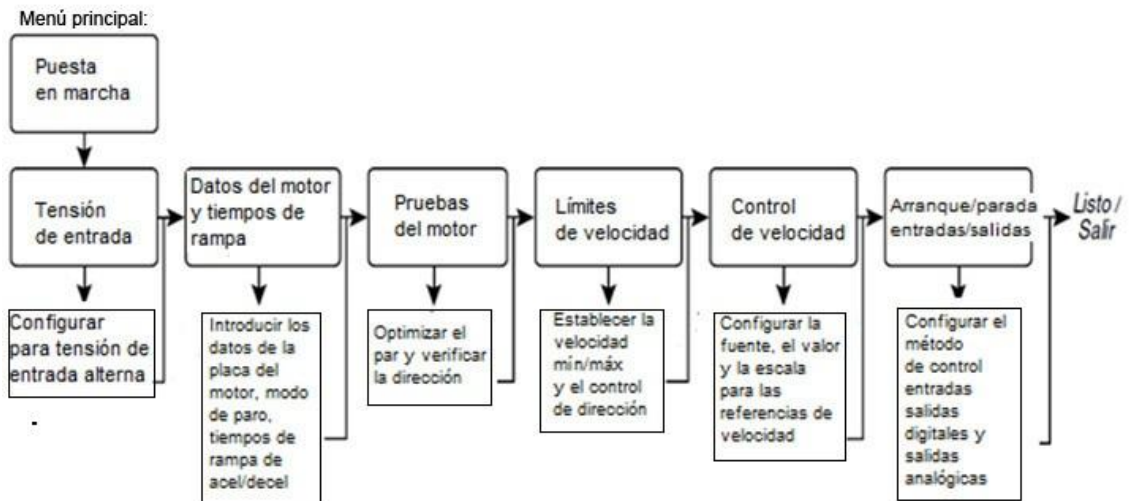
Hasta aquí los conceptos básicos generales respecto de los variadores de frecuencia, el cual es un tema muy amplio, que escapa del enfoque de este trabajo.

4.3. Programación del variador de frecuencia

Esta parte se centrará específicamente en los variadores de la casa Allen-Brandley; este proveedor cuenta con una amplia gama de variadores, dependiendo del tipo de motor a controlar se hace la elección.

Variadores que pueden trabajar con motores de 0.5 HP hasta motores de más de 150 HP.

Figura 63. **Menú configuración inicial para hacer trabajar un motor con el VFD**



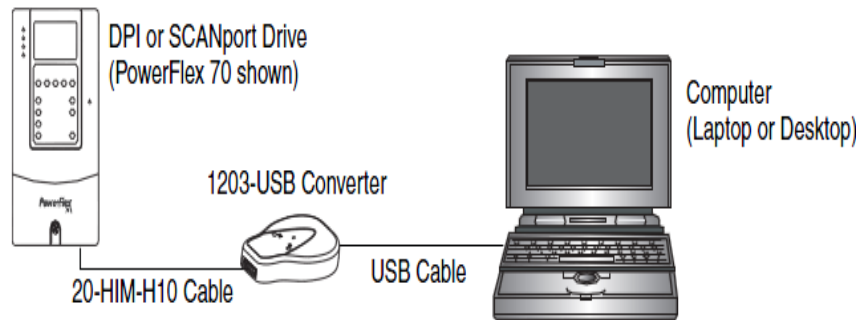
Fuente: Manual usuario PowerFlex 70. p. 35.

A manera de ejemplo, si se toma un motor trifásico 460 VAC, de 15 HP, el variador idóneo es un PowerFlex70, el cual proporciona la suficiente potencia para controlar el motor.

En la figura 63 se presentan los pasos necesarios para la programación del variador, para luego hacer trabajar el motor a través de un VFD.

Existen dos formas de programación de los VFD, una manual a través del teclado con la pantalla visual (HMI). Otra mucho más fácil a través de software y hardware, que consiste en un cable especial que se conecta del VFD a una PC; a través de esta, se programa el variador vía software en ambiente *Windows*, como se ve en la figura 64.

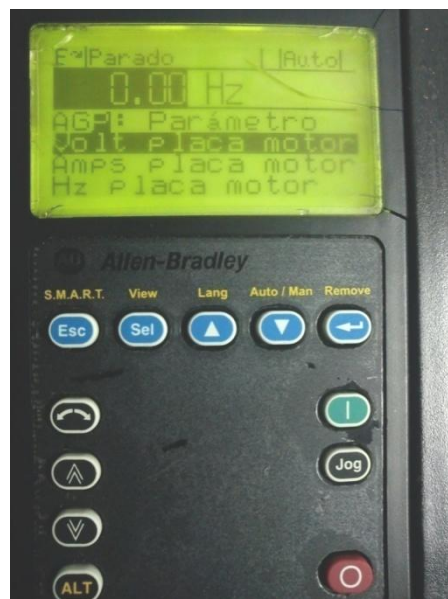
Figura 64. **Interfaz de programación de los VFD vía PC**



Fuente: Manual usuario interface 1203-USB. p. 5.

Esta última es la más versátil herramienta de programación y edición de los diferentes parámetros, al poder ver todos los parámetros de un archivo a la vez, aun estando trabajando el variador.

Figura 65. **Interfaz humano-máquina de los variadores**



Fuente: Programador de Envases de Centro América.

Otro beneficio es que se podrá crear copias de respaldo de toda la programación del VFD y guardarlo en un archivo para su posterior uso, en el caso de cambiar el VFD por otro.

La otra manera es accediendo parámetro por parámetro a través del HMI, uno a uno, lo que es más laborioso. En la figura 65 se puede ver la interfaz HMI.

Para ejemplo básico de iniciación, los principales parámetros a editar serán los de la placa del motor, modo de arranque y la fuente de referencia de velocidad.

Los demás parámetros se programarán según la necesidad del control sobre el motor y la aplicación en particular; el estudio completo de estos va más allá del alcance de este trabajo.

4.3.1. Parámetros de placa motor

Haciendo uso de la interface HMI del VFD, se presiona la tecla “esc”, hasta que muestre el menú principal; de estas opciones se elige la opción “Datos del motor”, estando dentro de estos, puede desplazarse entre los parámetros con los cursores arriba y abajo.

Para editar uno en particular, se presiona “enter” mostrando el valor programado, al presionar un nuevo valor desde el teclado numérico y después de presionar “enter”, automáticamente tomará el nuevo valor de parámetro, si no se presiona, y en su lugar se presiona esc, no habrá cambio de parámetro conservando el anterior.

Tabla II. **Parámetros de placa del motor**

CONTROL DEL MOTOR (Archivo B)	Datos del Motor	041	[Volt placa motor] Seleccionar según volt placa motor.	Valor Predet.: Basado en la capacidad nominal del variador Mín/Máx: 0.0/[Volts nomin var.] Unidades: 0.1 V CA	
		042	[Amps placa motor] Seleccionar según amps placa motor.	Valor Predet.: Basado en la capacidad nominal del variador Mín/Máx: 0.0/[Intens. sal. var] × 2 Unidades: 0.1 Amps	047 048
		045	[Pot. placa motor] Seleccionar según la pot. placa motor.	Valor Predet.: Basado en la capacidad nominal del variador Mín/Máx: 0.00/100.00 Unidades: 0.01 kW/HP Vea [Unid. pot. mtr.]	046
		046	[Unid. pot. mtr.] Las unidades de potencia mostradas en la placa del motor.	Valor Predet.: Basado en la capacidad nominal del variador Opciones: 0 "HP" 1 "kW"	
		047	[Hz sobrcrg. mtr.] Selecciona la frecuencia de salida por debajo de la cual se reduce la capacidad nominal de la intensidad de operación. La sobrecarga térmica del motor generará un fallo a bajos niveles de intensidad.	Valor Predet.: Hz placa motor/3 Mín/Máx: 0.0/Hz placa motor Unidades: 0.1 Hz	042 220


Fuente: Manual usuario inicio rápido, PowerFlex 70. p. 10.

Si se presiona esc repetidas veces, regresará al menú anterior y así hasta volver al menú principal. En la tabla II, se muestran los principales parámetros del archivo "Datos del motor".

4.3.2. **Parámetros de velocidad**

En la tabla III se muestran los parámetros de velocidad, los cuales deberán programarse como se explicó en el apartado anterior.

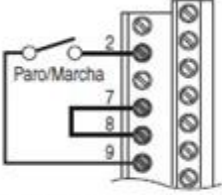
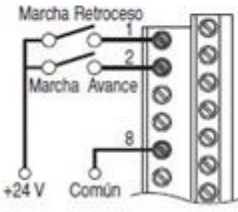
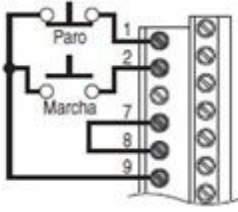
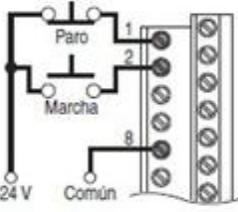
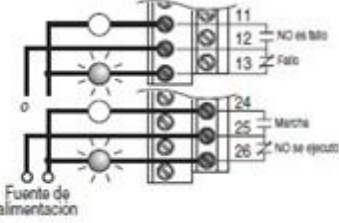
Tabla III. Parámetros de velocidad

COMANDO DE VELOCIDAD (Archivo C)	Referencias de Velocidad	090	<p>[Sel. ref. vel. A]</p> <p> Selecciona la fuente de la referencia de velocidad para el variador a menos que [Sel. ref. vel. B] o [Veloc. preesel. 1-7] esté seleccionado.</p> <p>Para más información sobre la selección de fuentes de referencia de velocidad, consulte el <i>Manual del Usuario del PowerFlex 70</i>, "Control de Referencia de Velocidad".</p> <p>(1) El apéndice B del Manual del Usuario contiene información sobre la ubicación de los puertos DPI.</p>	<p>Valor Predet.: 2 "Ent. anlg. 2"</p> <p>Opciones: 1 "Ent. anlg. 1"</p> <p>2 "Ent. anlg. 2"</p> <p>3-8 "Reservado"</p> <p>9 "Nivel MOP"</p> <p>10 "Reservado"</p> <p>11 "Veloc. preesel. 1"</p> <p>12 "Veloc. preesel. 2"</p> <p>13 "Veloc. preesel. 3"</p> <p>14 "Veloc. preesel. 4"</p> <p>15 "Veloc. preesel. 5"</p> <p>16 "Veloc. preesel. 6"</p> <p>17 "Veloc. preesel. 7"</p> <p>18 "Puerto 1 DPI"⁽¹⁾</p> <p>19 "Puerto 2 DPI"⁽¹⁾</p> <p>20 "Puerto 3 DPI"⁽¹⁾</p> <p>21 "Reservado"</p> <p>22 "Puerto 5 DPI"⁽¹⁾</p> <p>23 "Reservado"</p>	002 091 hasta 093 101 hasta 107 117 hasta 120 192 hasta 194 213 272 273 320 361 hasta 366
		091	<p>[Lím. sup. rf vel A]</p> <p>Escala el valor superior de la selección [Sel. ref. vel. A] cuando la fuente es una entrada analógica.</p>	<p>Valor Predet.: [Velocidad máxima]</p> <p>Min/Máx: -/[Velocidad máxima]</p> <p>Unidades: 0.1 Hz</p>	082
		092	<p>[Lím. inf. rf vel A]</p> <p>Escala el valor inferior de la selección [Sel. ref. vel. A] cuando la fuente es una entrada analógica.</p>	<p>Valor Predet.: 0.0 Hz</p> <p>Min/Máx: -/[Velocidad máxima]</p> <p>Unidades: 0.1 Hz</p>	081
	Velocidades Digitales	101 102 103 104 105 106 107	<p>[Veloc. preesel. 1]</p> <p>[Veloc. preesel. 2]</p> <p>[Veloc. preesel. 3]</p> <p>[Veloc. preesel. 4]</p> <p>[Veloc. preesel. 5]</p> <p>[Veloc. preesel. 6]</p> <p>[Veloc. preesel. 7]</p> <p>Proporciona un valor de comando interno fijo de velocidad. En modo bipolar la dirección se determina con el signo de la referencia.</p>	<p>Valor Predet.: 5.0 Hz</p> <p>10.0 Hz</p> <p>20.0 Hz</p> <p>30.0 Hz</p> <p>40.0 Hz</p> <p>50.0 Hz</p> <p>60.0 Hz</p> <p>Min/Máx: -/[Velocidad máxima]</p> <p>Unidades: 0.1 Hz</p>	090 093

Fuente: Manual usuario inicio rápido, PowerFlex 70. p. 12.

Para los modos de arranque del VFD se puede ver la tabla IV, donde se muestran las diferentes formas de control del variador. En la siguiente tabla puede verse el cableado del *driver*, los parámetros que deben de modificarse para ajustar el arranque del mismo, según la necesidad. Estos son los parámetros básicos, pero importantes, para hacer trabajar un motor a través de un VFD, de la marca Allen-Brandley.

Tabla IV. **Parámetros de arranque del VFD**

Entrada/salida	Ejemplo de conexión	Ajuste necesario de parámetros
Control de dos hilos sin inversión	<p data-bbox="662 443 816 468">Suministro interno</p> 	<p data-bbox="951 443 1187 499">Inhabilitar entrada digital 1: parám. 361 = 0, no se usa</p> <p data-bbox="951 520 1187 577">Establecer entrada digital 2: parám. 362 = 7, marcha</p>
Control de dos hilos con inversión	<p data-bbox="662 695 816 720">Suministro externo</p> 	<p data-bbox="963 695 1198 772">Establecer entrada digital 1: parám. 361 = 9, marcha retroceso</p> <p data-bbox="963 793 1198 871">Establecer entrada digital 2: parám. 362 = 8, marcha avance</p>
Control de tres hilos	<p data-bbox="662 968 816 993">Suministro interno</p> 	<p data-bbox="930 968 1187 1024">Use los ajustes de parámetros predeterminados en la fábrica.</p>
Control de tres hilos	<p data-bbox="662 1241 816 1266">Suministro externo</p> 	<p data-bbox="930 1241 1187 1297">Use los ajustes de parámetros predeterminados en la fábrica.</p>
Relés de Forma C energizados en estado normal.		<p data-bbox="930 1514 1089 1570">Seleccionar fuente: Parám. 380, 384</p>

Fuente: Manual usuario PowerFlex 70. p. 28.

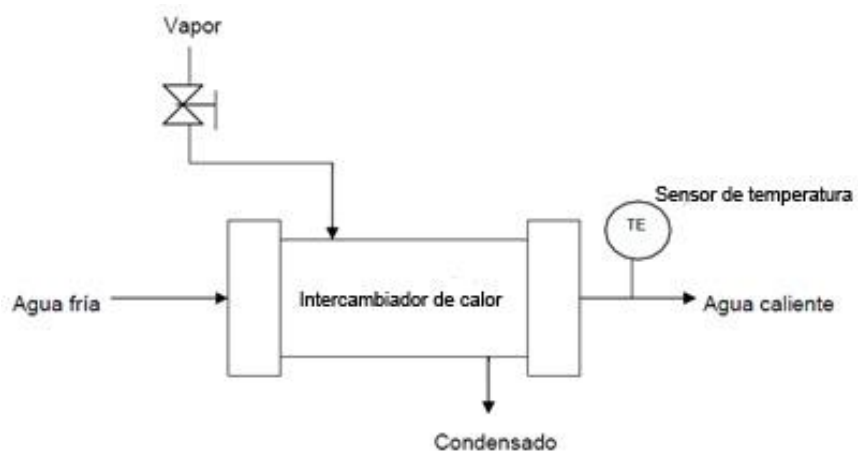
5. CONTROL PID

5.1. Teoría de control

Cualquier estudio de control de procesos debe comenzar por investigar cuál es el concepto de “proceso”. Desde el punto de vista de la producción, se considera un proceso como un lugar donde se juntan materias primas, más algún tipo de energía para producir un producto deseado.

Desde el punto de vista del control, el significado es más específico. Un proceso se identifica como una o más variables asociadas, cuyos valores es importante conocer y controlar.

Figura 66. Sistema de control de proceso

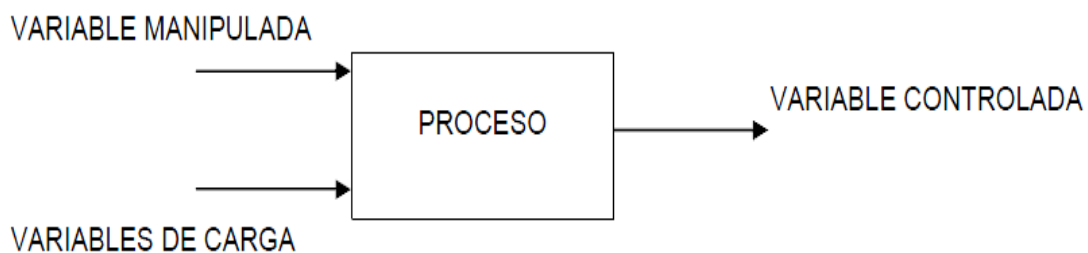


Fuente: http://infoplcn.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlProcesos.pdf. Consulta: enero de 2012.

Para una mejor comprensión de estos conceptos, es conveniente apoyarse en un proceso industrial simple, un intercambiador de calor. En este proceso, para mantener la temperatura del producto (agua caliente) se debe disponer de otra variable capaz de afectar la variable que está siendo controlada y que pueda ser manipulada por el sistema de control.

En este ejemplo, visto gráficamente en la figura 66, el sistema de control manipula la posición de una válvula de vapor. Sin embargo, la temperatura del agua depende no solo de la posición de esta válvula, sino también del caudal de agua, su temperatura de entrada, el grado de ensuciamiento del intercambiador y la temperatura ambiente. Este simple ejemplo muestra las variables controlada, manipulada y de carga; en la figura 67 se pueden ver gráficamente estas variables.

Figura 67. **Variable manipulada, de carga y controlada en el proceso**



http://infoplcn.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlProcesos.pdf.

Consulta: enero de 2012.

De lo anterior se define que:

- Variable controlada: temperatura de salida
- Variable manipulada: posición de la válvula

- Variable de carga: temperatura ambiente, caudal de agua de entrada, temperatura del vapor y suciedad del intercambiador

5.1.1. Variables controladas

Son los parámetros que indican la calidad del producto o las condiciones de operación del proceso; algunas de las más comunes usadas en la industria, pueden ser:

- Presión
- Temperatura
- Nivel
- Caudal
- Velocidad
- Humedad
- Posición, etc.

5.1.2. Variables manipuladas

Es la variable que se modifica o manipula para provocar un cambio sobre la variable controlada. Como ejemplo se pueden mencionar:

- Posición de una válvula
- Velocidad de un motor
- Accionamiento de un interruptor

5.1.3. Variables de carga

Son todas aquellas variables que afectan a la variable controlada, menos la que está siendo manipulada. En este caso en particular se pueden mencionar a manera de ejemplo.

- Temperatura ambiente
- Suciedad en el intercambiador

5.2. El problema del control

La relación entre las variables controladas, manipuladas y de cargas, define la necesidad de un control de proceso. La variable manipulada y las distintas variables de carga pueden aumentar o disminuir la variable, según el diseño del proceso.

En el caso del intercambiador de calor, los aumentos de la apertura de la válvula de vapor, la temperatura de entrada y la temperatura ambiente, tienden a elevar la temperatura del producto (agua de salida); mientras esta baja por aumentos de caudal y ensuciamiento del intercambiador.

La temperatura de salida responde al efecto neto de estas influencias. Si las influencias positivas son mayores que las negativas, la temperatura se eleva. Si se da el caso contrario, la temperatura baja.

Si todas las variables de carga han de permanecer constantes, es posible ajustar la válvula de vapor hasta que la temperatura del producto sea constante al valor deseado, y permanecer allí indefinidamente. El ajuste del proceso es necesario, puesto que estas variables no permanecen constantes.

Por ejemplo, las variaciones tanto de la temperatura de entrada como del caudal, modifican la temperatura del producto, y se requiere una posición diferente de la válvula de vapor para que la temperatura del agua pueda permanecer en el valor deseado.

La tarea del sistema de control es la de determinar y actualizar continuamente esta posición de válvula, a medida que cambien las condiciones de carga. Por lo general, el problema del control es determinar el único valor de la variable manipulada, que establece un equilibrio entre todas las influencias sobre la variable controlada y mantiene estacionaria la variable en el valor deseado. Sin importar cuán complicado sea, cada sistema de control resuelve este mismo problema básico, y para un proceso y condiciones de carga dadas, se debe llegar al mismo resultado.

5.3. Variable de proceso

La variable medida que se desea estabilizar (controlar) recibe el nombre de variable de proceso ("*process value*") y se abrevia PV; en otros libros también se le llama variable controlada. Un buen ejemplo de variable de proceso es la temperatura, la cual mide el instrumento controlador mediante un termopar o una PT100.

Otro ejemplo de una variable de proceso, puede ser un caudal (litros por minuto), este se mide mediante algún sensor y su transductor adecuado, que entreguen una señal de 4 a 20 mA, proporcional al caudal.

La corriente de 4 a 20 mA entra al controlador en donde se escala a las unidades originales de la variable de proceso.

Ejemplos adicionales de PV pueden ser velocidad, presión o humedad; cada una de las cuales se mide con el sensor apropiado y se convierten comúnmente a 4-20 mA, para ingresar al control.

En este trabajo se usará la temperatura como ejemplo de PV, por ser lo más intuitivo. Esto no hace perder generalidad, pues todo lo que se hable sobre temperatura y hornos es perfectamente análogo a sistemas de control de velocidad, presión, etc.

5.4. Set *point* (SP) de proceso

El valor prefijado (*set point*, abreviado SP) es el valor deseado de la variable de proceso, al cual el control se debe encargarse de mantener la PV. Por ejemplo en un horno, la temperatura actual es de 155°C y el controlador está programado de modo que la temperatura se pueda llevar a 200°C. De esto, entonces $PV = 155$ y $SP = 200$.

5.5. Error de proceso

Se define error de proceso a la diferencia entre la variable de proceso PV y el *set point*, SP.

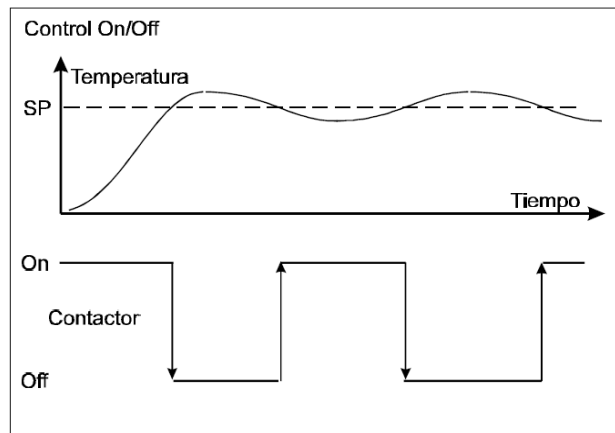
$$E = SP - PV \quad (\text{Ec. 6})$$

En el ejemplo anterior $E = (SP - VP) = (200^\circ\text{C} - 155^\circ\text{C}) = 45^\circ\text{C}$. Recordar que el error será positivo cuando la temperatura sea menor que el *set point*, $PV < SP$.

5.6. Control *on/off*

Si se toma como ejemplo, el caso de un horno eléctrico, la temperatura aumenta al activar las resistencias calentadas mediante un contactor, gobernado a su vez por un relé dentro del controlador. El modo de control *on/off* es lo más elemental y consiste en activar el mando de calentamiento cuando la temperatura está por debajo de la temperatura deseada SP y luego desactivarlo cuando la temperatura está por arriba. Lo descripción anterior, se puede apreciar gráficamente en la figura 68.

Figura 68. **Gráfica control *on/off***



Fuente: http://infopl.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

Inevitablemente, debido a la inercia térmica del horno, la temperatura estará continuamente fluctuando alrededor del SP. La inercia térmica es consecuencia del retardo en la propagación del calor en el interior del horno, desde la resistencia calentadora hasta el sensor de temperatura. No es difícil imaginar que las fluctuaciones aumentarán cuanto mayor sea la inercia térmica del horno (retardo).

Evidentemente, este algoritmo de control no es el más adecuado cuando se desea una temperatura constante y uniforme, pero sí ofrece la ventaja de provocar poco desgaste en los contactores electromecánicos, pues estos se activan y desactivan lo mínimo necesario.

5.7. Control *on/off* con histéresis

Para reducir aún más el desgaste, a veces se efectúa un control *on/off* con histéresis, es decir que el mando de calentamiento se activa unos pocos segundos por arriba del SP y se desactiva unos grados por abajo del SP, provocando por supuesto una mayor fluctuación de la temperatura, pero menor funcionamiento de los contactores.

El control *on/off* con histéresis se usa generalmente en cámaras frigoríficas donde la temperatura debe estar dentro de un rango y se desea activar y desactivar lo menos posible los motores del sistema de refrigeración.

5.8. PWM

Para poder controlar la temperatura con menos fluctuaciones, se debe entregar al horno una potencia gradual, en la medida requerida para mantenerlo a la temperatura deseada.

En el ejemplo anterior del control *on/off*, el relé del mando de calentamiento estará activado al 100%, entregando el máximo de potencia al horno o bien desactivado sin entregar potencia. El controlador proporcional entrega una potencia que varía en forma gradual entre 0 y 100%, según se requiera, y en forma proporcional al error (SP-PV).

Lo más natural para entregar una potencia que varía de 0% a 100% en forma continua sería usar un horno a petróleo o gas y que el control module la potencia mediante la llave de paso del combustible. La llave cerrada sería 0% de potencia y la llave totalmente abierta, 100%. El problema es que una válvula motorizada (gobernada mediante una señal 4-20 mA) es costosa y solo se justifica en aplicaciones que así lo requieran.

5.8.1. Tiempo de ciclo y PWM

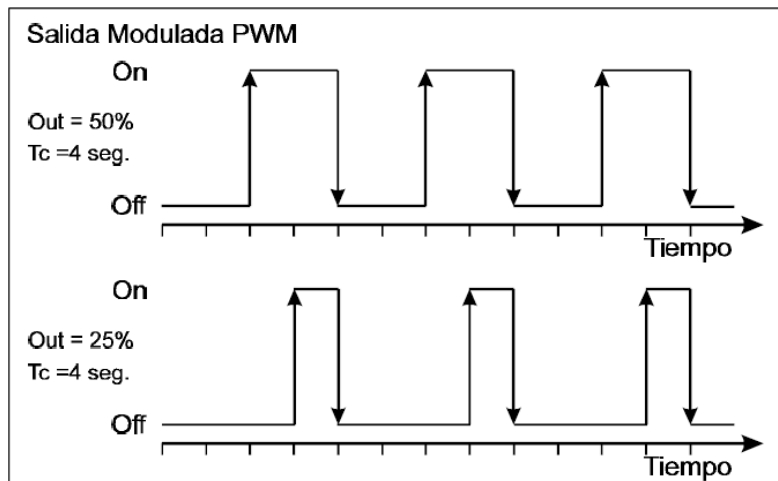
Afortunadamente es posible modular de 0% a 100% la potencia que recibe un horno eléctrico mediante el mismo contactor que se usaría para un control *on/ off*.

La idea es modular el tiempo de activación del contactor durante un lapso de tiempo fijo t_c , llamado tiempo de ciclo, menor al tiempo característico de respuesta del horno, de modo que este reciba filialmente un promedio de la potencia. Para ilustrar esta técnica conocida como modulación por ancho de pulso (PWM *pulse width modulation*) puede analizarse el siguiente ejemplo.

Suponiendo que un horno posee un tiempo de respuesta de 1 minuto, al aplicarle pulsos de calentamiento periódicos de 4 segundos, modulados en duración, el horno experimentará un calentamiento proporcional al promedio de tiempo que ha estado activado, sin que su temperatura siga las fluctuaciones de 4 segundos con que se aplica la potencia (ver figura 69).

Suponiendo que el horno funciona con un calefactor de 1000 W, si se requiere una potencia de 500 W, equivalente a 50% de la total, entonces se activa 2 segundos el relé y se desactivan otros 2, para luego empezar otro ciclo.

Figura 69. **Gráfica de la modulación PWM**



Fuente: http://infoplc.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

El efecto neto será que el horno recibe 50% de la potencia, pero la temperatura no fluctúa al ritmo del tiempo de ciclo, pues este es menor al tiempo de respuesta del horno.

Siguiendo con el ejemplo, si hace falta 250 W, es decir 25% de la potencia, basta con tener un segundo activado el relé y 3 segundos desactivados.

Para sistemas típicos, el tiempo de ciclo se ajusta entre 1 y 200 segundos, según sea el caso. A mayor tiempo de ciclo, menos desgaste de los contactores, pero siempre tiene que ser inferior al tiempo característico del sistema. La práctica recomendada es usar un tiempo de ciclo igual a la mitad del tiempo característico del sistema.

5.9. Control proporcional

Ya se mencionó que el controlador proporcional entrega una potencia que varía en forma proporcional al error (SP-PV). Para poner en marcha un controlador proporcional se deben fijar los siguientes parámetros:

- La temperatura deseada SP
- La banda proporcional Pb
- El tiempo de ciclo t_c

Por supuesto no hace falta definir el tiempo de ciclo si se va a usar una válvula motorizada como mecanismo de control. La banda proporcional Pb se programa en el controlador como un porcentaje del SP. Corresponde a una banda de temperatura situada por debajo del SP, a lo largo de la cual, la potencia de salida variará proporcionalmente al error (SP-PV), disminuyendo cuanto más cercana sea la temperatura al SP.

Internamente el controlador realizará el cálculo del porcentaje de salida "Out" mediante la siguiente fórmula:

$$Out = \left[100 * \frac{E}{banda} \right] \quad (Ec. 7)$$

$$banda = Pb * \frac{SP}{100} \quad (Ec. 8)$$

El paréntesis se usa para indicar saturación, es decir que si al evaluar el interior, resulta mayor al 100%, se deja en 100% y si resulta 0 o negativo, se deja en 0%.

A manera de ejemplo se puede definir que $SP = 200^{\circ}C$, $Pb = 10\%$ y $t_c = 4$ segundos; la potencia determinada por el control variará a lo largo de $20^{\circ}C$ abajo del SP. De la ecuación 8, sustituyendo los valores anteriores, se tendrá una banda igual a $20^{\circ}C$.

$$banda = 10 * \frac{200^{\circ}C}{100} = 20^{\circ}C$$

Tabla V. **Porcentaje de potencia de salida**

PV °C	Error (Ec. 6) °C	Potencia (Ec. 7) %
210	-10	0
202	-5	0
200	0	0
199	1	5
198	2	10
195	5	25
190	10	50
185	15	75
182	18	90
181	19	95
180	20	100
170	30	100
110	90	100

Fuente: http://infoplcn.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

Es decir que la banda a lo largo de la cual variará gradualmente la potencia estará entre $180^{\circ}C$ a $200^{\circ}C$. Por ejemplo, si la temperatura del horno es igual o menor a $180^{\circ}C$, la salida del control (potencia) será del 100%.

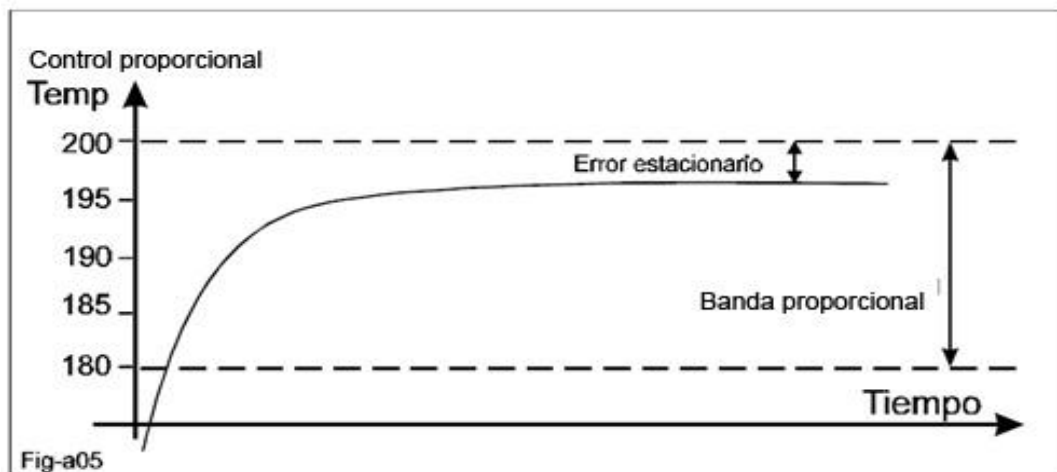
Cuando la temperatura esté en la mitad de la banda, es decir en 190°C, la salida será de 50% (ecuación 7):

$$out\% = \left[100\% \frac{E}{banda} \right] = 100\% \left(\frac{200-190}{20} \right) = 50\%$$

Al llegar la temperatura a 200°C, la salida será del 0%. En la tabla V, se presentan los valores tabulados usando la ecuación 7, del porcentaje de potencia de salida.

En la tabla V, se observa la potencia de salida (*out%*) suministrada por el controlador a distintas temperaturas para este ejemplo. En el gráfico de temperatura versus tiempo, se observa el comportamiento típico de un control proporcional (figura 70).

Figura 70. **Control proporcional**



Fuente: http://infopl.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

No es difícil imaginar un control *on/off* como uno proporcional con $P_b=0\%$, pues cuando la temperatura está arriba del SP ($E < 0$), la salida es del 0% y cuando la temperatura está abajo del SP ($E > 0$), es 100%.

5.9.1. Error estacionario

El control proporcional presenta el problema que la temperatura jamás se estabilizará justo en el valor del SP. En la práctica, se estaciona siempre en un punto dentro de la banda proporcional, produciendo así el "error estacionario".

La razón es fácil de entender recurriendo al ejemplo presentado. Suponiendo que la temperatura se estacionará en 200°C en forma estable y permanente, entonces la salida sería 0%. Pero siempre es necesario suministrarle al horno algo de potencia, por lo menos para compensar las pérdidas de calor al medio ambiente o calor contenido en el material que sale del horno.

Es evidentemente imposible que el horno se mantenga a 200°C con los calefactores permanentemente apagados. Luego la temperatura tiene que descender un poco, lo suficiente para que la potencia suministrada por los calefactores sea igual a las pérdidas de energía del horno (energía que sale del horno).

Suponiendo que para el horno las pérdidas son tales que hace falta 25% de la potencia de los calefactores para mantener la temperatura alrededor del SP, la temperatura se estacionará establemente a 195°C , pues para esa temperatura la salida es 25% (ver tabla V). Al valor del error en este punto, 5°C , se le llama error estacionario.

5.9.1.1. Reducción del error estacionario

El error estacionario se puede reducir disminuyendo la banda proporcional. Pero reducir mucho la banda proporcional volverá oscilatorio el sistema (más parecido a un *on/off*); luego existe un límite inferior y siempre habrá algo de error estacionario.

En particular, en los hornos que poseen mucha inercia térmica (mucho tiempo de retardo), se pueden presentar oscilaciones de la temperatura que solamente se podrán eliminar aumentando la banda proporcional y con ella aumentará el error estacionario.

Otro problema generado al aumentar la banda proporcional para eliminar las oscilaciones, es que el control pierde efectividad para responder rápidamente a perturbaciones externas (variaciones de la carga del horno, apertura de una puerta, etc.). Para mejorar la respuesta a transientes del control, se utiliza un control proporcional derivativo.

5.10. Control proporcional derivativo PD

Un control PD es uno proporcional al que se le agrega la capacidad de considerar también la velocidad de la temperatura en el tiempo. De esta forma se puede "adelantar" la acción de control del mando de salida, para obtener así una temperatura más estable.

Si la temperatura está por debajo del SP, pero subiendo muy rápidamente y se va a pasar de largo el SP, entonces el control se adelanta y disminuye la potencia de los calefactores.

Al contrario, si la temperatura es mayor que el SP, la salida debería ser 0%; pero si el control estima que la temperatura baja muy rápido y se va a pasar para abajo del SP, entonces le coloca algo de potencia a la salida para frenar poco a poco el descenso brusco. La acción derivativa es llamada a veces "*rate action*" por algunos fabricantes de controles, porque considera la "razón de cambio" de la temperatura.

Para entender a fondo el control PD se usará el mismo ejemplo anterior del horno, pero se agrega ahora un nuevo parámetro llamado constante derivativa D, medido en segundos. Internamente, el controlador realizará ahora el cálculo:

$$out = \left[100\% \frac{(E - D * Vel)}{banda} \right] \quad (Ec. 9)$$

Donde "Vel" es la velocidad de la temperatura medida por el controlador, en °C/seg. Se puede tomar como ejemplo fijando D=5 seg., SP= 200°C y Pb=10%. Suponiendo que en un momento dado la temperatura del horno es de 185°C y está subiendo a una velocidad de 2°C/seg, en un control proporcional, la salida debería ser de 75% (ecuación 7). Pero en este caso, el control PD toma en cuenta la velocidad de ascenso de la temperatura y la multiplica por la constante derivativa D y obtiene (ecuación 9):

$$out = \left[100 * \frac{15^{\circ}C - 5seg * 2^{\circ}C / seg}{20^{\circ}C} \right] = 25\%$$

Entonces, a pesar de que la temperatura actual es de 185°C, la salida es 25% en vez de 75%, al considerar la velocidad de ascenso de la temperatura.

La acción derivativa ocurre también fuera de la banda proporcional; en la tabla VI están tabulados los valores que se obtienen de la ecuación 9, para dos diferentes valores de velocidad; se puede ver que para esta misma velocidad de ascenso de 2°C/seg, la salida deja de ser 100% a partir de 170°C.

Tabla VI. **Control proporcional vs. proporcional derivativo**

SP=200°C Pb=10%			
PV °C	P Potencia D = 0	PD Potencia V=2°C/seg D = 5seg.	PD Potencia V=-1°C/seg D=5seg.
204	0	0	5
201	0	0	20
200	0	0	25
199	5	0	30
198	10	0	35
195	25	0	50
190	50	0	75
185	75	25	100
182	90	40	100
181	95	45	100
180	100	50	100
171	100	95	100
170	100	100	100

Fuente: http://infoplc.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

De la misma forma, si la temperatura está sobre 200°C pero descendiendo rápidamente, (velocidad negativa) por ejemplo -1°C/seg, entonces el control activará antes y con mayor potencia la salida, intentando que no baje de 200°C.

En la tabla VI se observan las potencias a distintas temperaturas para 3 casos: control proporcional, control PD con velocidad positiva y el mismo control PD con una velocidad negativa. El control PD permite obtener una temperatura muy estable, sin oscilaciones y sin necesidad de sacrificar la respuesta ante perturbaciones, aumentando la banda proporcional.

5.11. Control proporcional integral PI

Se retomará ahora el problema inconcluso del "error estacionario" tratado en la sección dedicada al control proporcional. Para ello se continúa utilizando el mismo ejemplo del horno a 200°C con $P_b=10\%$, estacionado a 195°C, para entregar 25% de potencia. Una forma de eliminar el error estacionario podría ser aumentando un 25% la salida de control mediante algún ajuste manual, de modo que se estacione en 200°C.

Algunos controles antiguos permitían este ajuste y era llamado "*Manual reset*" o "ajuste manual"; el problema con este ajuste es que será efectivo mientras el horno esté con las mismas características que cuando se realizó. Por ejemplo, si por alguna razón las pérdidas del horno disminuyen a 20%, la temperatura subirá por arriba de 200°C, creando un error por arriba del SP. La forma efectiva de solucionar el problema del error estacionario es agregando al control proporcional el término "Integral" llamado también a veces "*automatic reset*" o "*reset action*"; en el presente caso se le llamará "acción integral".

El control será el mismo proporcional, pero a la salida se le suma la acción integral, que lo corrige tomando en cuenta la magnitud del error y el tiempo que este ha permanecido.

Para ello se le programa al control una constante I, que es formalmente "la cantidad de veces que aumenta la acción proporcional por segundo". La salida se corrige en una cantidad equivalente a la integral del error multiplicada por I. Si parece complicado, es porque en realidad lo es un poco.

Recurriendo a una analogía de un "saco" se podrá entender cómo opera la acción integral. La integral del error es simplemente la suma acumulada de los errores medidos por el control cada segundo.

Es como un saco al cual se le va metiendo cada segundo una cantidad equivalente al error medido en ese segundo. Si existe un error de 5°C, entonces el saco va creciendo, aumentando su tamaño cada segundo, en una cantidad de 5.

Si el error es de 0°C, entonces nada se le agrega al saco y este permanece en el mismo tamaño. Pero si existe un error negativo, por ejemplo T = 202°C, entonces se le sacará 2 al saco cada segundo que permanezca este error y el tamaño del saco irá disminuyendo. La idea es que la salida del control será la misma que en un control proporcional, más la magnitud del saco multiplicada por la constante I. Internamente el control PI realiza el cálculo con la siguiente fórmula, donde el acumulador es lo mismo que el saco:

$$out = 100 * \left[\frac{E + I * Acum}{banda} \right] \quad (Ec. 10)$$

$$out = \left[\left(100 * \frac{E}{banda} \right) + \left(100 * \frac{I * Acum}{banda} \right) \right] \quad (Ec. 11)$$

Tabla VII. Valores de salida usando control PI

Seg	PV °C	Error °C	Acumulador °C	Out PI
0	195	5	0	25.00
1	195	5	5	26.00
2	195	5	10	27.00
3	195	5	15	28.00
4	195	5	20	29.00
5	195	5	25	30.00
6	196	4	29	25.80
7	196	4	33	26.60
8	196	4	37	27.40
9	196	4	41	28.20
10	196	4	45	29.00
11	197	3	48	24.60
12	197	3	51	25.20
13	197	3	54	25.80
14	197	3	57	26.40
15	198	2	59	21.80
16	198	2	61	22.20
17	198	2	63	22.60
xx	200	0	125	25.00

Fuente: http://infopl.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

Puede verse qué pasa al horno al colocarle una acción integral con los siguientes datos:

$$I=0.04/\text{seg}; SP=200^{\circ}\text{C}; Pb = 10\%$$

Usando estos valores en la ecuación 11, se tabulan los datos como se muestra en la tabla VII.

Con la temperatura estacionada en 195°C (por efecto de las pérdidas estimadas en 25%), a partir de un segundo se activa la acción integral; desde ese momento cada segundo el saco aumenta en 5°C.

La potencia de salida irá aumentando cada segundo, mientras el error sea 5°C, en la cantidad de 1%, según la ecuación 11.

$$\left(100 * \frac{I * Acum}{banda}\right) = \left(100 * \frac{0.04 * 5}{20}\right) = 1\%$$

En el sexto segundo, el aumento de potencia de salida ha forzado el alza de la temperatura y así la reducción del error a 4°C. El alza de la potencia de salida es continua pero más lenta, incrementándose cada segundo en 0.8% (ecuación 11).

$$\left(100 * \frac{I * Acum}{banda}\right) = \left(100 * \frac{0.04 * 4}{20}\right) = 0.8\%$$

El proceso continúa de la misma forma, aumentando el tamaño del acumulador hasta que en algún momento el error sea definitivamente eliminado, pues solo en ese momento se detendrá el incremento de la potencia de salida. Entonces, será el acumulador (o la integral) quien supla el "ajuste" de la potencia necesaria para mantener el horno a 200°C.

Por muy pequeño que sea el valor programado de I, siempre corregirá el error estacionario, pero tardará más tiempo en hacerlo.

Por el contrario, si se programa un valor excesivo de I, entonces la acción integral tendrá mucha fuerza en la salida y el sistema alcanzará rápidamente el SP; pero lo más probable es que siga y se sobrepase por efectos de la inercia térmica. Entonces, la acción integral (con error negativo) será en sentido contrario y el saco irá disminuyendo rápidamente con la magnitud del error. Como consecuencia, habrá una excesiva disminución de la potencia de salida y la temperatura probablemente baje del SP, entrando así el sistema en un ciclo oscilatorio.

En la práctica, normalmente I deberá ser grande solo en sistemas que reaccionan rápidamente, (por ejemplo controles de velocidad de motores) y pequeño para sistemas lentos con mucha inercia (hornos).

En general, los valores de la constante I son relativamente pequeños; para la mayoría de los sistemas el valor adecuado de I varía entre 0 y 0.08 segundos. Por tal motivo en muchos controles, la cantidad I se programa multiplicada por 10000. Es decir que para tener una acción integral de 0.01 segundos, se programa $I=0.01*10000=100$.

5.12. Control proporcional integral derivativo PID

Debe entenderse que un control PID es proporcional con acción derivativa y acción integral simultáneamente superpuestas. Matemáticamente la ecuación del controlador PID es:

$$u(t) = k \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(\tau)}{dt} \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

De esta manera, la variable de control es una suma de tres términos: el término P, que es proporcional al error; el término I, que es proporcional a la integral del error; y el término D, que es proporcional a la derivada del error. Los parámetros de los controladores en general son: la ganancia proporcional K, el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d .

Para fines prácticos del presente trabajo no se entrará en detalle en el desarrollo matemático de la ecuación 12, basta con tener el concepto matemático. En el mercado existe una amplia variedad de controladores PID y todos tendrán diferente forma de programación, pero a todos los gobierna la ecuación 12.

5.12.1. Banda proporcional

La banda proporcional está definida como el rango en el que los cambios del proceso causan un cambio porcentual de 0 a 100% en la salida del controlador. La banda puede o no estar centrada alrededor del valor de la referencia, dependiendo de los requerimientos del estado estacionario del proceso. La banda puede ser corrida mediante un *offset* manual o por la acción integral (*reset* automático) para mantener el error en cero. La banda proporcional está expresada como porcentaje del rango de entrada del sensor, el cual es fijo para termocuplas y RTDs.

La banda proporcional debe ser ajustada para obtener la mejor respuesta a una perturbación, reduciendo lo más posible el sobrepaso. Bajos valores de la banda proporcional (alta ganancia), producen una respuesta rápida del sistema de control, a expensas de la estabilidad y de un sobrepaso considerable.

Por su parte, altos valores de la banda proporcional producen una respuesta lenta con largos periodos de oscilaciones pobremente amortiguadas. Finalmente, una banda proporcional del 0.0% hace que el controlador trabaje en el modo de control *on/off*.

5.12.2. Constante de tiempo integral

Es el tiempo requerido para que la acción integral contribuya a la salida del controlador en una cantidad igual a la acción proporcional, con un error de control constante. La combinación de estas dos acciones permite efectuar lo que se conoce como el “*reset automático*”, tal que, mientras exista un error constante, la acción integral repite la acción proporcional cada tiempo integral. De esta manera se produce un corrimiento de la banda proporcional, tendiente a eliminar el error en estado estacionario.

La acción integral cambia la señal de control para llevar la salida del proceso al valor de la referencia. Las constantes de tiempo integral muy rápidas permiten un acercamiento también rápido, de la salida a la referencia; pero presentan problemas de fuertes transitorios y grandes sobrepasos, lo que se conoce como “*sobrecompensación*”.

Por su parte, los tiempos integrales que son muy lentos (tiempos grandes) causan una respuesta lenta a los errores en estado estacionario. La acción integral puede ser deshabilitada poniendo el tiempo integral a cero. Si el tiempo integral es puesto a 0, el valor previo de la salida integral se mantiene en la memoria del controlador. Si se deshabilita la acción integral, el controlador dispone de un “*reset manual*” cuyo ajuste le permite al operador eliminar el error en estado estacionario.

El controlador puede evitar la acción integral cuando se opera fuera de la banda proporcional (integración condicional), evitando, de esta manera, el *windup* del integrador.

5.12.3. Constante de tiempo derivativa

Es el tiempo requerido para que la acción proporcional contribuya a la salida del controlador en una cantidad igual a la acción derivativa, con un error de control rampa. De esta manera, mientras exista un error rampa, la acción derivativa es repetida por la acción proporcional cada tiempo derivativo.

La acción derivativa se usa para acortar el tiempo de respuesta del proceso y ayuda a estabilizar, utilizando una acción predictiva basada en los cambios de la salida del proceso.

El incremento del tiempo derivativo ayuda a estabilizar la respuesta; sin embargo, valores muy grandes en conjunción con el ruido de la señal de medición, pueden causar oscilaciones de consideración pobremente amortiguadas. Por su parte, valores muy bajos del tiempo derivativo, usualmente producen grandes sobrepasos y pérdida de estabilidad.

5.12.4. Offset de salida del controlador

Si la constante de tiempo integral es puesta a cero, puede ser necesario modificar la salida del controlador para eliminar los errores en estado estacionario. Para este caso, se usa el *offset* de salida del controlador que permite recorrer la banda proporcional y compensar los errores en estado estacionario.

5.13. Implementación del controlador PID

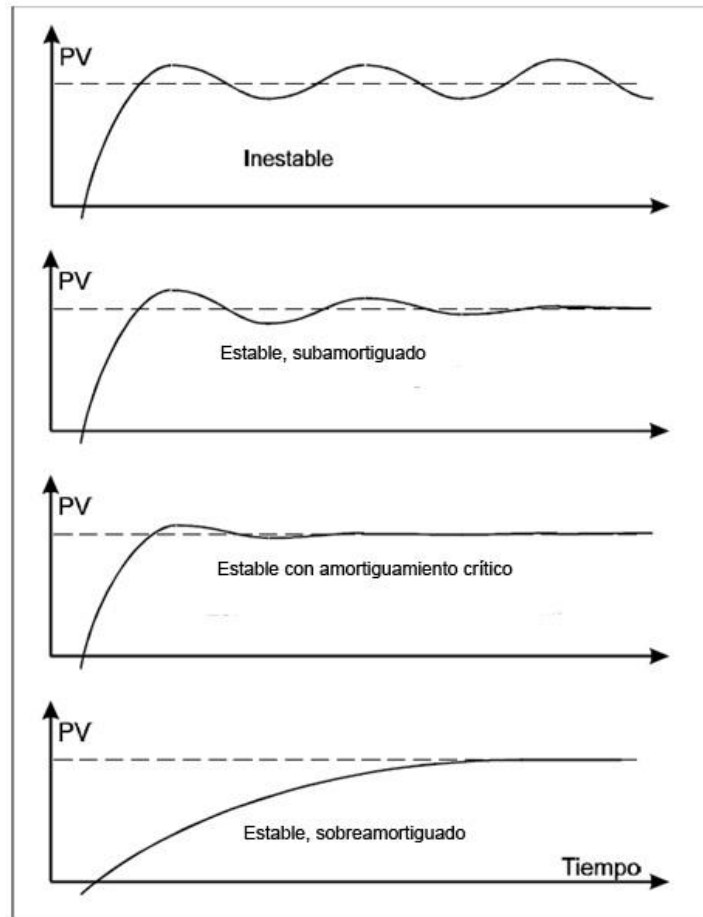
Al tener un controlador en las manos, la pregunta es cómo elegir los valores de los parámetros P_b , D , I , t_c que debe introducir en el flamante controlador PID. Existe un solo conjunto de valores P_b , D , I que darán el rendimiento óptimo y encontrarlos requiere conocimientos teóricos, habilidad obtenida mediante la experiencia y suerte.

Pero no hay por qué desalentarse, en realidad cualquier conjunto de valores cercanos al óptimo, brindará un rendimiento aceptable y probablemente casi igual al óptimo. Además, afortunadamente existe un par de métodos experimentales para encontrar una aproximación de estos parámetros. Pero antes de entrar en detalle sobre cómo encontrarlos, se definirán algunos conceptos útiles.

Se dice que un sistema y su controlador tienen un comportamiento inestable cuando después de un tiempo razonable de funcionamiento y sin ocurrir perturbaciones externas, la temperatura permanece fluctuando en forma oscilatoria, ya sea con un período regular o errático.

Este sería por ejemplo el caso de un control *on/off* o uno proporcional con P_b muy pequeño. Por otra parte, un comportamiento estable es tal que la temperatura se mantiene en un valor constante mientras no ocurran perturbaciones externas. Siempre se busca que el sistema de control sea estable, pero además, dentro de las condiciones de estabilidad existen 3 tipos de comportamiento bien definidos: control subamortiguado, control con amortiguamiento crítico y control sobreamortiguado (ver figura 71).

Figura 71. **Comportamiento del controlador PID**



Fuente: http://infoplcn.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

En cada uno de estos casos varía la velocidad de respuesta del sistema ante perturbaciones y a la vez la propensión a tener comportamiento inestable u oscilatorio. El sistema sobreamortiguado tiene una velocidad de respuesta lenta después de que ocurra una perturbación; el sistema puede tardar en volver al SP, pero la ventaja es que el sistema es muy estable y no adquiere comportamientos oscilatorios indeseables.

Esta condición tiende a ocurrir cuando la banda proporcional P_b es más grande de lo necesario. También puede deberse a una constante derivativa D muy grande, basta recordar que la acción derivativa tiende a frenar la temperatura. En el otro extremo, cuando un sistema se comporta de modo subamortiguado, la velocidad de respuesta es muy buena, pero pueden ocurrir varias oscilaciones de cierta amplitud antes que la temperatura llegue a un valor estable.

Suele ocurrir esta condición cuando la banda proporcional P_b es pequeña (se parece a un *on/off*), la constante derivativa D pequeña y la constante I grande. Justo en medio entre las condiciones anteriores está el amortiguamiento crítico. A esta condición corresponden los valores óptimos de los parámetros P_b , d , I . En este caso el sistema es bastante estable y la velocidad de repuesta es la mejor que se puede lograr.

5.14. Sintonización de un PID

Los valores de la banda proporcional P_b , constante de integración I , constante de derivación D y tiempo de ciclo t_c , determinan el correcto funcionamiento del controlador. Para cada sistema (máquina, horno, etc.), existe un conjunto de estos parámetros que optimiza el funcionamiento del sistema, redundando en mejora de la producción y economía de energía.

Por otra parte, una selección no adecuada de parámetros podría provocar un control inestable, es decir una temperatura oscilante y susceptible a perturbaciones. Los valores óptimos para estas constantes son aquellos en que el sistema exhiba un "amortiguamiento crítico". Encontrar analíticamente estos valores resulta prácticamente imposible, pero afortunadamente existen dos métodos prácticos para encontrar una buena aproximación de estas constantes.

5.14.1. Método de las oscilaciones de lazo cerrado

El primer procedimiento aquí descrito es práctico y simple, no requiere equipo adicional pero existen casos en que puede ser útil un registro gráfico de la temperatura. Dependiendo de la capacidad de comunicación del controlador, en el caso de un PLC se facilita más el método.

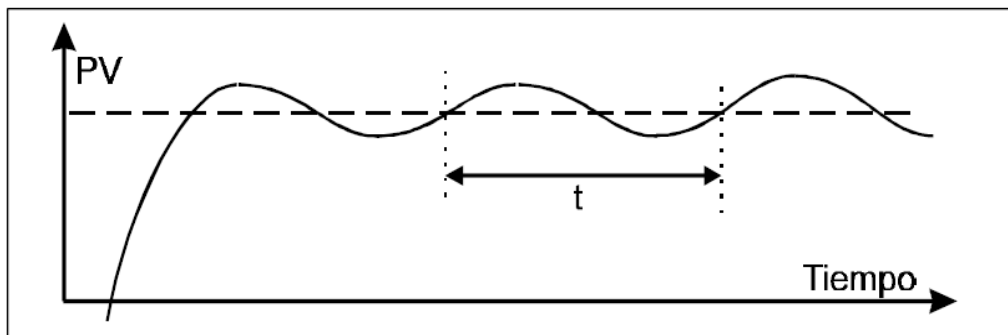
- Un valor razonable de t_{cl} con el que se puede empezar y luego modificar es $t_{cl}=6$ segundos.
- Ajustar el valor de "SP1" a la temperatura de operación.
- Ajustar la banda proporcional a $P_b = \text{"Prop"} = 10\%$ para empezar.
- Retirar la acción integral y derivativa colocando: $I=0$ y $D=0$.
- Permitir ahora que el sistema funcione por un rato suficiente como para que la temperatura llegue al "SP1" y exhiba un comportamiento regular, ya sea estable u oscilatorio, alrededor de "SP1". Esto puede tomar en algunos sistemas un tiempo de hasta 30 minutos.
- Si en este momento la temperatura adquiere un comportamiento oscilatorio regular, aumentar P_b al valor inmediatamente superior. Esperar un tiempo prudente para ver si persisten las oscilaciones; si ocurre, volver a aumentar P_b .

Si el sistema se estabilizó en una temperatura constante inferior al "SP1", contenida dentro de la banda proporcional y sin oscilar (error estacionario), entonces disminuir un poco la banda proporcional P_b .

Disminuir hasta que empiecen a ocurrir las oscilaciones (cuando pasa de estable subamortiguado a inestable). Cada vez que disminuya la banda proporcional, se debe esperar un tiempo prudente, como para observar si han empezado las oscilaciones. Llamar P_o al valor de la banda proporcional encontrado, en el que el sistema se torna oscilatorio. Medir el período " t " en segundos, de las oscilaciones que ocurren con este valor P_o .

Se entiende como período el tiempo entre dos máximos o dos mínimos de la temperatura. (ver la figura 72).

Figura 72. **Oscilaciones de lazo cerrado**



Fuente: http://infopl.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

Usando t en segundos, los valores sugeridos para este sistema serán:

$$"P" = 1.5 * P_o$$

$$"I" = 10000 / t$$

$$"D" = t / 8$$

$$"TCL" = t / 4$$

Estos valores "P", "I", "D" y "tcl" son los que deben ser introducidos en el instrumento. El valor de la constante de integración introducida "I" varía de 1 a 800; pero en realidad, como el instrumento divide internamente este valor entre 10000, equivale a un rango de 0.0001 ... 0.08 (1/segundos) o 0.006 ... 4.8 (1/minutos).

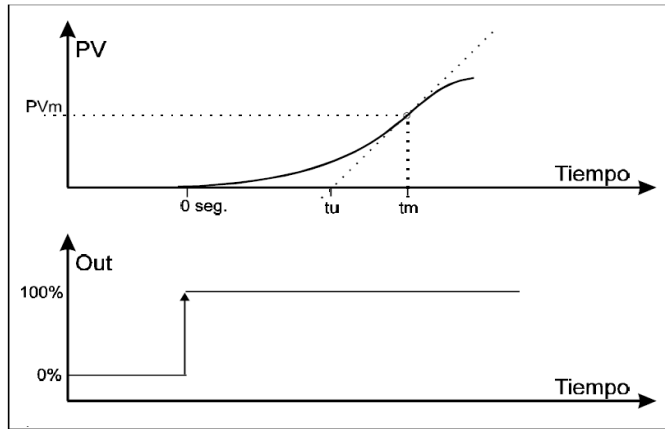
Si se está hablando de un instrumento en general, se deberá consultar el manual para un instrumento específico donde no habrá mayor diferencia de lo descrito aquí, puede que cambien los nombres de los parámetros.

5.14.2. Método de la respuesta al escalón

La otra forma del método de Ziegler - Nichols consiste en observar la respuesta del sistema a una señal de control del 100% en forma de escalón, elaborando un gráfico de la temperatura versus tiempo. Disponer de salida de gráficos será muy útil, casi imprescindible. El método tiene un defecto y es que no siempre se puede poner al máximo la salida del control sin el riesgo de sobrecalentar el material en el horno. Si se considera que no se presenta este problema, se puede proceder así:

- En el instante de tiempo $t = 0$, activar la salida del mando de calentamiento al máximo. Esto se puede hacer manualmente en las conexiones a los contactores, o bien simplemente colocar un valor del SP mucho más alto de lo que se usará normalmente y con $D=0$, $I=0$.
- Elaborar un gráfico de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) versus tiempo (seg.). El gráfico se considera suficiente en el momento en que la temperatura ya no crece con el máximo de velocidad que pudo alcanzar. Se obtendrá de esta forma un gráfico similar al de la figura 73.

Figura 73. Respuesta al escalón



Fuente: http://infopl.net/files/documentacion/control_procesos/infoPLC_net_ControlPID.pdf.

Consulta: enero de 2012.

- Determinar el punto del gráfico en que la curva obtuvo su mayor pendiente o velocidad de subida. Sean (t_m, PV_m) las coordenadas de ese punto. Trazar ahora una recta tangente al punto (t_m, PV_m) y que corte el eje del tiempo en un tiempo t_u . El valor t_u es un retardo característico del sistema, bastante similar al tiempo t de oscilación, hallado por el método de las oscilaciones (t debe ser aproximadamente $2t_u$).

Los parámetros óptimos determinados por este método son los siguientes:

$$V_{\max} = PV_m / (t_m - t_u) \quad (\text{Ec. 13})$$

$$"P" = 1.7 * V_{\max} * t_u * 100\% / SP \quad (\text{Ec. 14})$$

$$"D" = t_u / 4 \quad (\text{Ec. 15})$$

$$"I" = 0.5 * 10000 / t_u \quad (\text{Ec. 16})$$

$$"tcl" = t_u / 2 \quad (\text{Ec. 17})$$

5.15. Control *feedforward* (control por adelanto)

Los controladores con realimentación del proceso no tienen en cuenta la influencia de las perturbaciones que se producen y que afectan al lazo de control. Debe existir un error para que se inicie la acción correctiva. Un medio para corregir el efecto de las perturbaciones es el control "*Feedforward*", el cual compensa el efecto de las mismas antes que produzcan error en la variable de proceso. Este sistema está limitado por la exactitud de las medidas, los cálculos efectuados y las perturbaciones no medidas.

En pocas palabras se puede decir que el control *Feedforward* (FFC), es una estrategia usada para compensar perturbaciones presentes en un sistema, antes de que ellas afecten la variable controlada. En este caso, se mide una variable que pueda afectar la variable controlada, se predice su efecto y se aplica una acción correctiva anticipadamente al mismo.

Para lograr la capacidad predictiva del FFC es necesario conocer la relación entre la variable, cuyo efecto se desea suprimir y la variable de proceso, en lo que constituye un modelo total o parcial del proceso, tomando en cuenta que la calidad del control del mismo estará en función de la calidad del modelo usado para lograr la compensación de las perturbaciones presentes y el comportamiento de otras variables no compensadas que pueden afectar a la variable controlada.

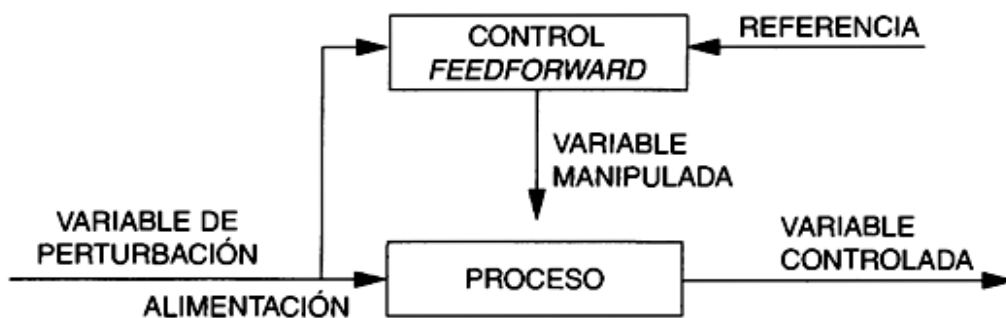
El tiempo de respuesta del FFC debe ser menor que el tiempo muerto entre la presencia de la perturbación y la manifestación del efecto en la variable de proceso. Este tiempo muerto debe ser conocido para sincronizar la salida del controlador. Se pueden considerar múltiples variables como entrada al FFC y compensar el efecto combinado de las perturbaciones en ellas.

5.15.1. Teoría de control *feedforward*

De los capítulos precedentes se sabe que cualquier proceso se puede describir en función de las relaciones existentes entre la salida y dos grupos de entradas: la salida del proceso que es la variable de proceso o variable controlada (VP/Vc), que es la variable dependiente, y la entrada, conocida a su vez como variable manipulada (VM) o independiente.

Las variables asociadas a la carga son el otro tipo de independientes, conocidas como variables de perturbación (Vp).

Figura 74. **Control *feedforward***



Fuente: ACEDO SANCHEZ, José. Instrumentación y control básico de procesos. p. 266.

La figura 74 muestra un diagrama de bloques en el que aparecen las tres variables descritas. Como puede verse, cada una de las entradas llega al proceso por un lugar diferente, por lo que afectan de distinta forma a la variable controlada. La ecuación que describe al proceso es:

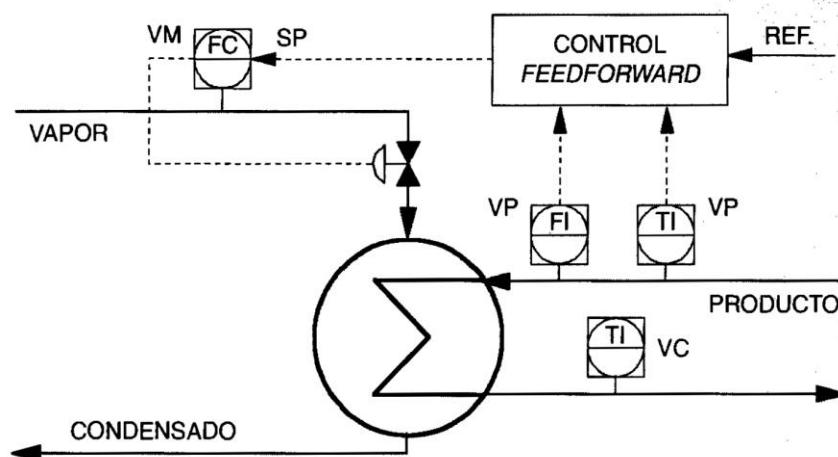
$$VP = (V_m * G_m) - (V_p * G_p) \quad (\text{Ec.18})$$

Donde G_m y G_p son las ganancias de transferencia, y la variable de proceso es igual a la diferencia ponderada entre la variable manipulada y la variable de perturbación. El objeto del sistema de control *feedforward* es mantener la variable de proceso controlada en un valor de referencia «R» que debe ser igual al valor deseado para la variable de proceso. Con estos datos se puede obtener el valor de la variable manipulada a partir de la ecuación anterior.

$$V_m = \frac{(R + V_p * G_p)}{G_m} \quad (\text{Ec. 19})$$

Si el cálculo de la variable manipulada es correcto, para cualquier valor de la variable de perturbación se mantendrá constante el valor de referencia, es decir, el valor de la variable controlada (variable de proceso).

Figura 75. **Ejemplo del control *feedforward***



Fuente: ACEDO SÁNCHEZ, José. Instrumentación y control básico de procesos. p. 267.

5.15.2. Control anticipado en un intercambiador de calor

En la figura 75 se muestra el diagrama de flujo de proceso que incluye un control *feedforward* donde se muestra que la temperatura de salida es la variable controlada (variable de proceso), el caudal de producto y su temperatura de entrada son variables de perturbación, mientras que el caudal de vapor es la variable manipulada.

Aplicando un balance de energía, se obtiene el modelo en estado estacionario del proceso de intercambio de calor.

$$H_S * F_S = (F_P * C_P) * (T_S - T_e) \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

Hs = entalpía del vapor (kcal/kg)

Fs = caudal de vapor (kg/h)

Fp = caudal de producto (kg/h)

Cp = calor específico del producto (kcal/kg °C)

Ts = temperatura de salida (°C)

Te = temperatura de entrada (°C)

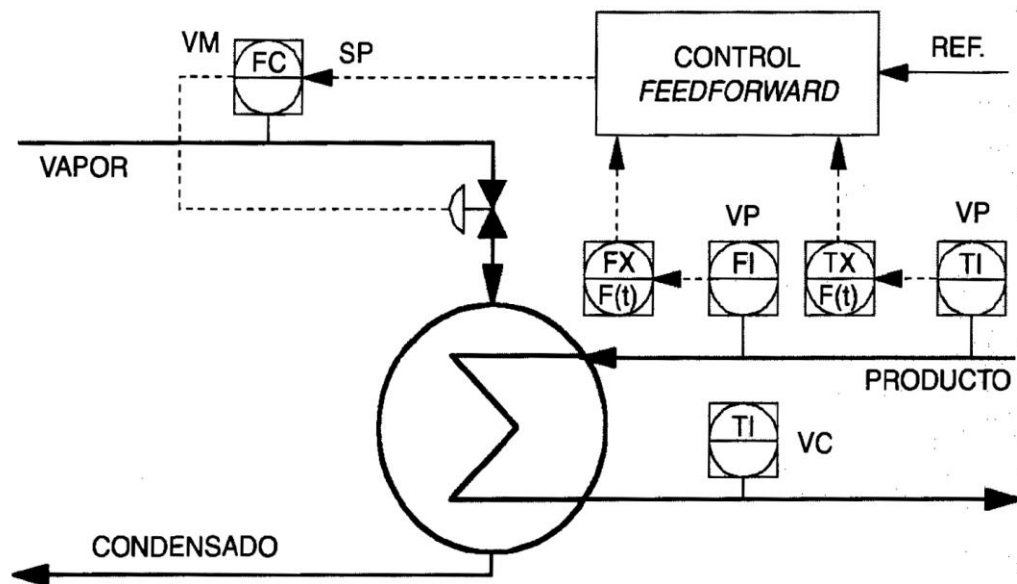
En este ejemplo, la referencia es la temperatura de salida deseada. Si no existieran otras perturbaciones, se podría fijar el caudal de vapor necesario para mantener esta temperatura.

$$F_S = F_P \left(\frac{C_P * (R - T_e)}{H_S} \right) \quad (\text{Ec. 21})$$

El cálculo anterior se basa en el modelo en estado estacionario, en el cual no se contemplan las diferentes dinámicas que afectan a las variables en función de su propia naturaleza y el lugar donde se encuentran situadas en el proceso.

Para llevar a cabo la compensación dinámica, es necesario introducir una función de tiempo *lead/lag* en las variables de perturbación, de forma que el sistema de control pasa a ser el de la forma que se presenta en la figura 76.

Figura 76. **Compensación dinámica en control *feedforward***



Fuente: ACEDO SÁNCHEZ, José. Instrumentación y control básico de procesos. p. 268.

La compensación dinámica hace coincidir en el tiempo las variables, para que no se produzca desviación entre el valor real de la variable de proceso y el valor deseado como referencia.

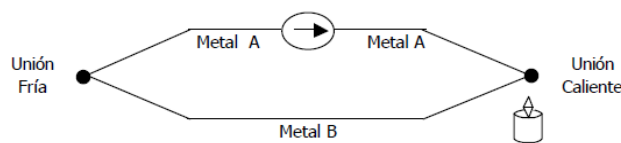
La figura 77 muestra el sistema de control anterior, incluyendo un controlador de temperatura en la línea de salida de producto, el cual actúa como reajuste o *feedback*. Este controlador mantendrá la temperatura en el valor de referencia deseado, corrigiendo los desequilibrios producidos por las perturbaciones no medidas y los errores de cálculo.

6. TERMOPARES

El termopar es el sensor de temperatura más usado en la industria por diferentes razones; se puede mencionar entre otras, el amplio intervalo de temperatura de uso, su robustez, la relativa buena exactitud, rápida respuesta a cambios de temperatura, versatilidad de uso y bajo costo.

El termopar fue descubierto por Thomas Seebeck en 1831; él descubrió que una corriente eléctrica fluía en un circuito cerrado de dos metales distintos, cuando una de las uniones era calentada. La magnitud y dirección de la corriente son función de la diferencia de temperatura de las uniones y de las propiedades térmicas de los metales usados en el circuito. A este fenómeno se le conoce como efecto Seebeck; se puede ver en la figura 78.

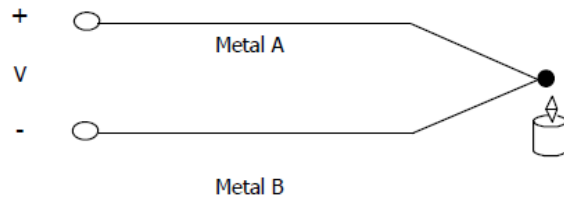
Figura 78. **Efecto Seebeck**



Fuente: http://www.inymet.com.mx/web_inymet/ingenieria_y_metrologia/informacion/info/termopares.pdf. Consulta: febrero de 2012.

Si se abre este circuito, se obtiene una diferencia de potencial pequeña (milivolts), la cual es directamente proporcional a la temperatura de la unión y a la composición de los dos metales (ver figura 79).

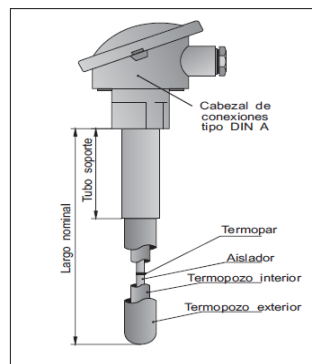
Figura 79. **Deferencia potencial en la unión fría**



Fuente: http://www.inymet.com.mx/web_inymet/ingenieria_y_metrologia/informacion/info/termopares.pdf. Consulta: febrero de 2012.

La diferencia de potencial (ddp) no puede ser medida directamente con un voltímetro, debido a que la unión del termopar con el voltímetro crea un nuevo circuito termoeléctrico. Estos dispositivos suelen ir encapsulados en vainas (figura 80), para protegerlos de las condiciones extremas en ocasiones del proceso industrial que tratan de ayudar a controlar; por ejemplo, suele utilizarse acero inoxidable para la vaina, de manera que en un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

Figura 80. **Aspecto físico de un termopar**



Fuente: <http://www.metring.com/notes/HI-10-10-MT2009.pdf>. Consulta: febrero de 2012.

Además, según la distancia a los aparatos encargados de tratar la pequeña señal eléctrica de estos transductores, deben utilizarse cables compensados para transportar esta señal sin que la modifique, de una manera fácilmente reconocible y reversible para los dispositivos de tratamiento de la señal.

Las conexiones entre el cable de compensación, el termopar y el instrumento deben ser perfectas, sin empalmes en el cable de compensación, utilizando el hilo correcto.

El conjunto de la instalación debe evitar el paso próximo por fuentes de calor (aparece el efecto Thompson).

Si estas recomendaciones no se cumplen, aparecen tensiones térmicas de corriente continua que dan lugar a un desplazamiento en la calibración del instrumento.

El termopar es susceptible al ruido eléctrico industrial debido a que durante su funcionamiento puede generar tensiones de 2 a 50 mV y se encuentra en un entorno donde las grandes máquinas eléctricas pueden crear cientos de milivoltios en el cable de conexión.

El termopar, trabajando como una antena, puede recoger radiación electromagnética de radio televisión y microondas; de aquí que se requiera que los cables de conexión estén trenzados y dentro de una funda metálica que se pone a tierra; que la unión de medida esté puesta a tierra y que el amplificador tenga una buena relación señal/ruido.

Entre las ventajas de los termopares están:

- Bajo costo
- No hay piezas móviles, menos probabilidad de romperse
- Amplia gama de temperaturas
- Tiempo de reacción razonablemente corto
- Capacidad de repetición y exactitud razonables

Las desventajas son:

- La sensibilidad es baja, generalmente $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ o menos.
- Generalmente la exactitud no es mejor que 0.5°C .
- Requiere una temperatura de referencia, generalmente la del hielo (0°C).

6.1. Tipos de termopares

La selección de los alambres para termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, oxidación, reducción, y a la cristalización; que desarrollen una fem relativamente alta, que sean estables, de bajo costo y de baja resistencia eléctrica y que la relación entre temperatura y la fem sea tal, que el aumento de esta sea (aproximadamente) paralelo al de la temperatura.

A continuación se presenta un resumen de los tipos de termopares comunes más utilizados en la medición de temperaturas en procesos, y sus principales características en la tabla VIII.

Tabla VIII. Tipos de termopares

Tipo	Aleación		Rango de utilización	f.e.m. producida (mV)
	Conductor +	Conductor -		
J	Hierro (Fe) (magnesio)	Constantan (Cu - Ni)	-210 a 760° C	-8,096 a 42,919
K	Níquel-cromo (Ni - Cr)	Níquel-aluminio (Ni - Al) (magnético)	-270 a 1200° C	-6,458 a 48,838
T	Cobre (Cu)	Constantán Cobre-níquel (Cu - Ni)	-270 a 400° C	-6,258 a 20,872
E	Níquel-cromo (Ni - Cr)	Constantán Cobre-níquel (Cu - Ni)	-270 a 1000° C	-9,835 a 76,373
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si)	Nisil (Ni-Si-Mg)	-270° a 1300° C	-4,345 a 47,513 mV
R	Cobre (Cu)	Aleación 11 (Cu - Ni)	-50° a 1768° C	-0,226 a 21,101
S	Cobre (Cu)	Aleación 11 (Cu-Ni)	-50° a 1768° C	-0,236 a 18,693
B	Cobre (Cu)	Cobre (Cu)	0° a 1820° C	0,000 a 13820

Fuente: http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.4%20Temperatura.pdf. Consulta: febrero de 2012.

En los termopares listados en la tabla anterior, el primer conductor siempre es el positivo y los colores se aplicarán tanto a los conductores como a los cables. En los casos en los que los conductores en los termopares no estén identificados por color, se podrán identificar de la siguiente forma:

- Tipo J: el conductor positivo es magnético
- Tipo T y U: el conductor positivo es color cobre
- Tipo K: el conductor negativo es magnético
- Tipo S y R: el conductor negativo es más maleable que el positivo

6.1.1. Termopar tipo J

También se le denomina un termopar hierro–constantán; se dan los detalles en particular de este termopar, por ser el utilizado en el presente trabajo.

- Termoelemento positivo (JP): Fe (99,5%)
- Termoelemento negativo (JN); Cu (55%) Ni(45%)
- Rango de utilización: -210°C a 760°C
- Fem producida: -8,096 mV a 42,919 mV

El termopar tipo J puede utilizarse en atmósferas neutras, oxidables o reductoras.

No se recomienda en atmósferas muy húmedas y a bajas temperaturas (el termoelemento JP se vuelve quebradizo).

Sobre los 540°C, el hierro se oxida rápidamente no se recomienda en atmósferas sulfurosas por encima de 500°C.

6.2. Cables compensados según normas IEC y DIN

Los cables compensados para los termopares según las normas IEC o DIN tienen sus características eléctricas y mecánicas, especificadas en las normas IEC 584-3 y la DIN 43714.

Sus aleaciones tienen la misma composición química que los termopares a que corresponden, cuando se los denomina cables de extensión.

En cambio los cables compensados se fabrican con aleaciones de materiales especiales, pero con las mismas características termoeléctricas de los termopares con las que deben trabajar; esto siempre dentro de un limitado rango de temperatura ambiente, y que será el ambiente donde estarán tendidos.

Se los designa con un código de tres letras, como se ve a continuación:

- Primera letra: termopar con la que trabaja
- Segunda letra:
 - X: mismo material que la termopar (idéntica aleación)
 - C: material especial
- Tercera letra: muchas aleaciones compensadas se designan con una tercera. A manera de ejemplo:
 - KX: cable de extensión para termopar tipo K, aleación idéntica a la del termopar.

- RCA: cable compensado para termopar tipo R, aleación especial, material tipo A.

6.2.1. Código de colores para cables compensados y de extensión

Los colores para cables según DIN están especificados en la norma DIN 43713 (1990). Para termopares, según IEC 584, el conductor positivo tiene el mismo color que la cubierta exterior, el negativo es siempre blanco; para más información puede consultarse la hoja técnica 00700.

Para el cable correspondiente a la termopar tipo B, no hay codificación designada. Por la curva tan "plana" característica del termopar tipo B, se puede utilizar conductor de cobre en lugar de cable compensado.

De acuerdo con la DIN 43714, los cables serán trenzados entre ellos, para mejor protección de campos electromagnéticos.

Se puede proveer protección adicional por blindaje de cinta o pantalla. La resistencia de aislación entre los conductores y entre conductor y cubierta, no debe ser menor a 100 megohmios / m, a la máxima temperatura de operación.

La tensión de prueba debe ser superior a 500 VCA. En la tabla IX, se pueden ver los tipos de cables, según el termopar usado.

Tabla IX. **Tolerancias límites para cables compensados y de extensión según IEC 584-3**

Termocupla y tipo de alambre	Tolerancia clase		Rango de temperatura de operación °C	Temp. Med. °C
	1	2		
JX	$\pm 85 \text{ mV} / \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 140 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	- 25 a + 200	500
TX	$\pm 30 \text{ mV} / \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 60 \text{ mV} / \pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$	- 25 a + 100	300
EX	$\pm 120 \text{ mV} / \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 200 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	- 25 a + 200	500
KX	$\pm 60 \text{ mV} / \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 100 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	- 25 a + 200	900
NX	$\pm 60 \text{ mV} / \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 100 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	- 25 a + 200	900
KCA	---	$\pm 100 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	0 a + 150	900
KCB	---	$\pm 100 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	0 a + 100	900
NC	---	$\pm 100 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	0 a + 150	900
RCA	---	$\pm 30 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	0 a + 100	1000
RCB	---	$\pm 60 \text{ mV} / \pm 5.0 \text{ }^\circ\text{C}$	0 a + 200	1000
SCA	---	$\pm 30 \text{ mV} / \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$	0 a + 100	1000
SCB	---	$\pm 60 \text{ mV} / \pm 5.0 \text{ }^\circ\text{C}$	0 a + 200	1000

Fuente: http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.4%20Temperatura.pdf. Consulta: febrero de 2012.

7. MONTAJE MECÁNICO, HIDRÁULICO, ELÉCTRICO Y PROGRAMACIÓN DEL PID ANTICIPADO

La instalación hidráulica y mecánica fue realizada por personal contratista, en un día de paro por mantenimiento programado de 12 horas. Quedando como trabajo la instalación eléctrica de los sensores, y el cableado de estos al panel de control de la máquina, para finalmente terminar programando la rutina de PID en el programa principal del PLC.

7.1. Especificaciones de la instalación mecánica/hidráulica

Las especificaciones de la instalación realizada por los contratistas fueron las siguientes.

- Cortar tubería de suministro del soluble a las máquinas de la bomba a una altura de 2 metros.
- Instalar tubería de enfriamiento que vendrá del *chiller*, el cual proporciona agua fría para el intercambiador.
- Instalar el intercambiador de calor de lado oeste, a 50 centímetros del tanque principal del soluble, al borde de las bombas.
- El intercambiador deberá ser anclado al piso.

- Instalar tubería de alimentación de aire comprimido para la servoválvula, con su respectivo regulador de presión neumática, usando manguera de ½" para esto.
- A la salida de las bombas, en la nueva tubería de suministro de soluble, deberán instalar un *bypass*; en caso de ser necesario, deshabilitar el intercambiador de calor.
- A la salida del intercambiador de calor, se deberá colocar un niple de 1" para la instalación del termopar.
- En la tubería de entrada del soluble al intercambiador, de la misma manera colocar un niple de 1", para la instalación del sensor de flujo.
- Toda la tubería deberá ser del mismo tamaño en pulgadas; al instalado actual, la tubería será de 4".
- Toda la tubería deberá ser aislada para evitar pérdidas de temperatura con la temperatura ambiente.
- Instalar llaves cheque a la entrada de la tubería del *chiller* y del soluble.
- En ambas tuberías de entrada y salida del soluble se deberán instalar niples de 1", para la instalación de termómetros.
- Toda la tubería deberá tener la capacidad de soportar una presión máxima de 100 psi.

7.2. Datos del intercambiador de calor

En la tabla X están tabuladas las especificaciones técnicas del intercambiador de calor que se instaló, el cual corresponde a un intercambiador de marca *KerrPump & Supply*, modelo M10M-FM-30.

Tabla X. **Especificaciones técnicas del intercambiador de calor**

	Unidad	Lado caliente	Lado frío
Fluido		agua	agua
Densidad	lb/ft ³	61.72	62.12
Capacidad específica de calor	Btu/lb, °F	1.00	1.00
Conductividad térmica	Btu/ft, h, °F	0.368.	0.36
Viscosidad de entrada	cP	0.55	1.01
Viscosidad de salida	cP	0.65	0.07
Razón de volumen del flujo	GPM	250.00	164.50
Temperatura entrada	°F	122.00	68.00
Temperatura de salida	°F	104.00	95.00
Caída de presión	psi	4.52	2.33
Intercambio de calor	kBtu/h	2217	
L.M.T.D.	°F	31.3	
Coeficiente de transferencia de calor	Btu/ft ² , h, °F	1230	
Área de transferencia	ft ²	66.3	
Dirección relativa de los fluidos	Contracorriente		
Número de platos	30		
Platos efectivos	28		
Número de pases	1		1
Capacidad extensión	12		
Material platos	Aleación 316		
Material <i>gaskets</i>		NBRP CLIP-ON	NBRP CLIP-ON
Material de revestimiento		no revestido	no revestido
Diámetro de conexión	pulgadas	4	4
Orientación nariz		S1-> S2	S4<-S3
Código presión de bisel	ALS		
Presión de diseño	psi	100	100
Presión de prueba	psi	130	130
Temperatura de diseño	°F	150	150
longitud x ancho x altura	pulgadas	34 x 19 x43	
Volumen líquido	ft3	0.5	0.5
Peso neto vacío/operando	lb	658	721

Fuente: <http://pdf.directindustry.com/pdf/alfa-laval/m3-m6-m10-m15-series-plate-heat-exchanger/16602-133157.html>. Consulta: marzo de 2012.

7.3. Bombas centrífuga

Las bombas centrífugas también llamadas rotodinámicas, son siempre rotativas y son un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor.

El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, que por el contorno, su forma lo conduce hacia las tubuladuras de salida o hacia el siguiente rodete; se basa en la ecuación de Euler y su elemento transmisor de energía se denomina impulsor rotatorio llamado rodete, en energía cinética y potencial requeridas y es este elemento el que comunica energía al fluido en forma de energía cinética.

Las bombas centrífugas se pueden clasificar de diferentes maneras:

- Por la dirección del flujo en: radial, axial y mixto.
- Por la posición del eje de rotación o flecha en: horizontales, verticales e inclinados.
- Por el diseño de la coraza (forma) en: voluta y las de turbina.
- Por el diseño mecánico de la coraza en: axialmente bipartidas y las radialmente bipartidas.
- Por la forma de succión en: sencilla y doble.

Aunque la fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad en la periferia del impulsor como de la densidad del líquido, la energía que se aplica por unidad de masa del líquido es independiente de la densidad del líquido. Por tanto, en una bomba dada que funcione a cierta velocidad y que maneje un volumen definido de líquido, la energía que se aplica y transfiere al líquido, (en pascales, metros de columna de agua, o pie-lb/lb de líquido) es la misma para cualquier líquido, sin que importe su densidad.

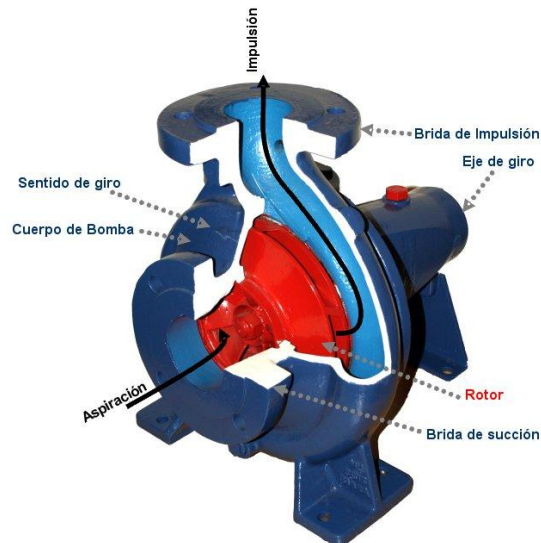
Tradicionalmente, la presión proporcionada por la bomba en metros de columna de agua o pie-lb/lb se expresa en metros o en pies, y es por ello que se denomina genéricamente como "altura", y aún más, porque las primeras bombas se dedicaban a subir agua de los pozos desde una cierta profundidad (o altura).

Las bombas centrífugas tienen un uso muy extendido en la industria, ya que son adecuadas casi para cualquier uso. Las más comunes son las que están construidas bajo normativa DIN 24255, con un único rodete, que abarcan capacidades hasta los 500 m³/h y alturas manométricas hasta los 100 metros, con motores eléctricos de velocidad normalizada.

Estas bombas se suelen montar horizontales, pero también pueden estar verticales y para alcanzar mayores alturas, se fabrican disponiendo varios rodetes sucesivos en un mismo cuerpo de bomba. De esta forma se acumulan las presiones parciales que ofrece cada uno de ellos.

En este caso se trata de bomba multifásica o multietapa, pudiéndose lograr de este modo alturas del orden de los 1200 metros para sistemas de alimentación de calderas. En la figura 81 se puede apreciar la construcción de una de estas bombas que se usó en el proyecto.

Figura 81. **Partes de una bomba centrífuga**



Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bomba_centrifuga.jpg. Consulta: marzo de 2012.

7.3.1. **Válvula de bola**

Este tipo de válvula fue usado en el *bypass* a la salida del soluble y es la misma que comanda la servoválvula.

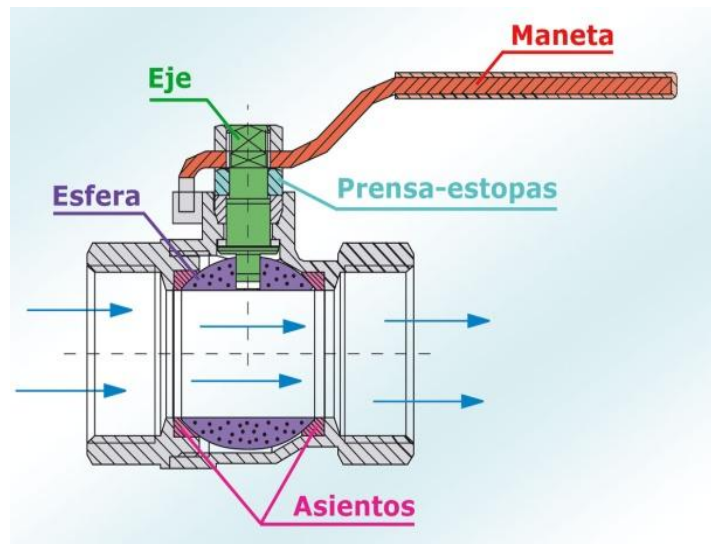
Una válvula de bola, conocida también como de "esfera", es un mecanismo de llave de paso que sirve para regular el flujo de un fluido canalizado y se caracteriza porque el mecanismo regulador situado en el interior tiene forma de esfera perforada.

Se abre mediante el giro del eje unido a la esfera o bola perforada, de tal forma, que permite el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y la salida de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida.

La posición de la manilla de actuación indica el estado de la válvula (abierta o cerrada). Este tipo de válvulas no ofrece una regulación precisa al ser de $\frac{1}{4}$ de vuelta. Su ventaja es que la bola perforada permite la circulación directa en la posición abierta con una pérdida de carga bastante más reducida que las de asiento, y corta el paso cuando se gira la maneta 90° y cierra el conducto.

Las válvulas de bola manuales pueden cerrarse rápidamente, lo que puede producir un golpe de ariete. Por ello y para evitar la acción humana, pueden estar equipadas con un servomotor ya sea neumático, hidráulico o motorizado; en la figura 82 se muestra la construcción de una válvula de bola.

Figura 82. **Partes de una llave de bola**



Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esquema_valvula_de_bola.jpg. Consulta: Marzo de 2012.

7.3.2. Regulador/filtro para aire comprimido

El filtro/regulador proporciona aire de alta calidad con la presión adecuada para sistemas neumáticos, con espacio reducido y bajo caudal; se utilizará uno para alimentar el mecanismo de movimiento que abre o cierra la servoválvula, el cual fue montado en una tubería horizontal, cerca del equipo. El regulador incluye un manómetro para indicar la presión de salida.

7.3.3. Funcionamiento del regulador/filtro para aire comprimido

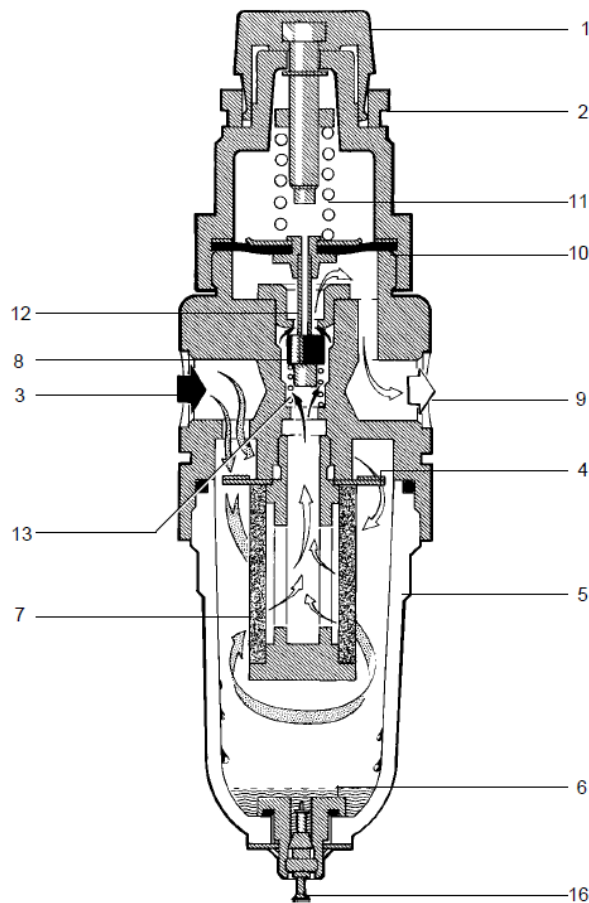
La parte del filtro combina las ventajas de un separador centrífugo y un elemento de malla fina. Puede verse en la figura 83, el aire comprimido contaminado (3) el cual entra directamente en la campana (5) a través del separador (4). La mayoría de las gotas y partículas se depositarán en el fondo de la campana (6). El aire es filtrado por la malla de 5 micras del elemento (7) antes de pasar a la válvula principal (8) de la parte del regulador. Con el volante de ajuste (1) girado en sentido contrario a las agujas del reloj, el resorte de la válvula (13) mantiene la válvula (8) cerrada.

Girando el volante de ajuste en el sentido de las agujas del reloj, se comprime el resorte de control (11), el conjunto diafragma (10) es empujado abriendo la válvula principal (8). Así que el aire fluye hacia el lado de salida (9) del filtro/regulador. La presión del secundario aumenta en la parte inferior del diafragma. Así como la presión controlada varía, también varía la fuerza bajo el diafragma. Cuando esta fuerza (proporcional a la presión de salida) se iguala con la presión del resorte de control, la válvula principal cierra.

Cualquier disminución de la presión de salida produce la apertura de la válvula principal para mantener la presión del secundario.

Cualquier aumento de la presión del secundario por encima del valor de ajuste, hace que el diafragma y empujador (12) se eleven. Esto permite al aire escapar a través del centro del empujador hacia la atmósfera. Cuando el exceso de presión ha sido eliminado, el orificio del empujador se cierra. Debe asegurarse que la campana se drene periódicamente mediante la válvula de acción rápida (16).

Figura 83. **Elementos del regulador de presión de aire comprimido**



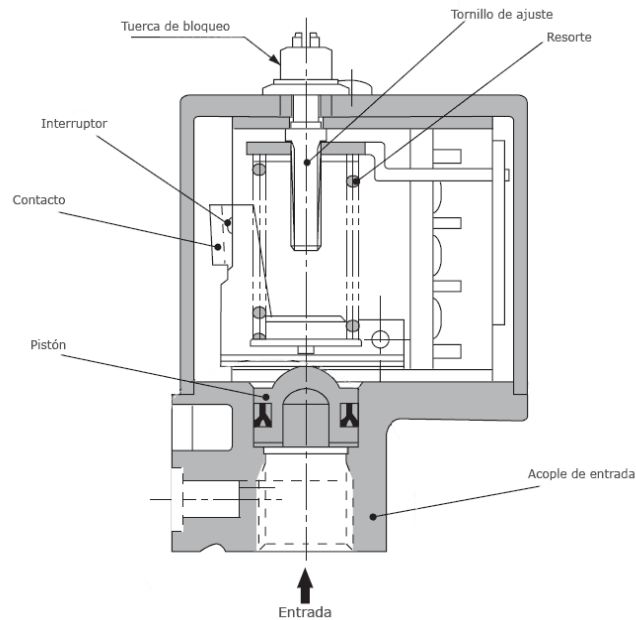
Fuente: <http://www.spiraxsarco.com/mx/pdfs/TI/p054-01.pdf>. Consulta: marzo de 2013.

7.3.4. Presostato de seguridad

El presostato también es conocido como interruptor de presión. Es un aparato que cierra o abre un circuito eléctrico, dependiendo de la lectura de presión de un fluido. El fluido ejerce una presión sobre un pistón interno, haciendo que se mueva hasta que se unen dos contactos. Cuando la presión baja, un resorte empuja el pistón en sentido contrario y los contactos se separan.

Un tornillo permite ajustar la sensibilidad de disparo del presostato al aplicar más o menos fuerza sobre el pistón a través del resorte. Usualmente tienen dos ajustes independientes: la presión de encendido y la presión de apagado. En la figura 84 se puede ver la construcción interna de un presostato.

Figura 84. **Construcción interna de un presostato**



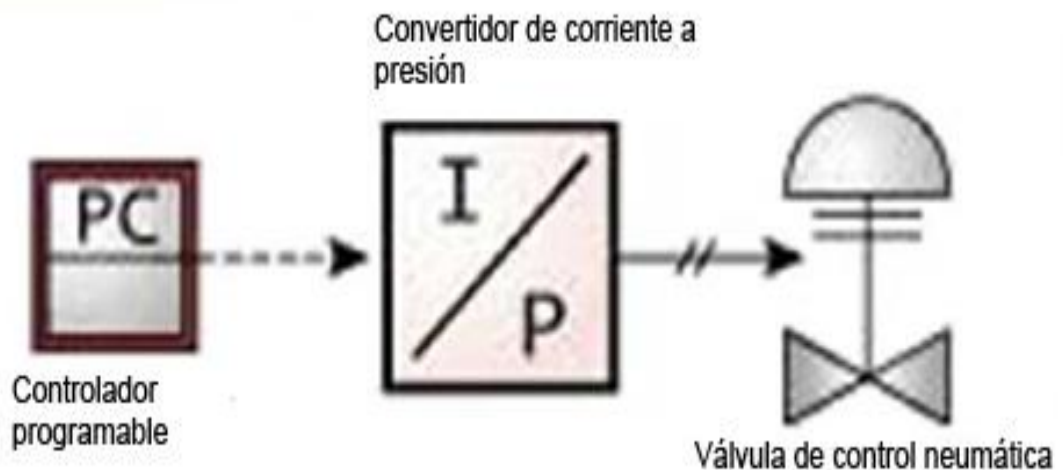
Fuente: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Presostato.gif>. Consulta: marzo de 2012.

Por seguridad, en caso de fallo en el suministro de aire comprimido para la servoválvula, se instaló un sensor de presión de aire (presostato), el cual al caer la presión a menos del seteado, hace activar una alarma para avisar al operador del problema.

7.4. Válvula proporcional I/P

Instrumento que recibe una señal estándar y la envía modificada en forma de señal de salida estándar. Se diferencia de un transmisor o transductor, en que el convertidor no mide variables en forma directa, sino que solamente manipula señal de corriente a presión; es similar a un transmisor electrónico de presión y los rangos de señal estándar son los mismos (3-15 psi/4-20 mA). En la figura 85 se puede ver gráficamente la idea de funcionamiento de la válvula proporcional.

Figura 85. Partes de una válvula proporcional



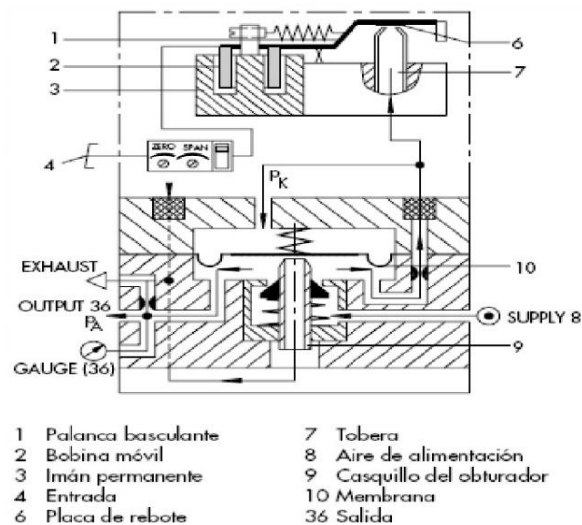
Fuente: http://www.sapiensman.com/neumatica/convertidores_IP.php.

Consulta: marzo de 2012.

7.4.1. Funcionamiento válvula proporcional

El aparato está compuesto de una unidad convertidora I/P, que funciona según el sistema de compensación de fuerzas y un amplificador de caudal volumétrico conectado a continuación. La corriente continua de entrada (4) pasa por la bobina móvil (2) situada en el campo de un imán permanente (3). En la palanca basculante (1) se contrarresta la fuerza de la bobina móvil, proporcional a la corriente eléctrica, con la fuerza de la presión dinámica, producida por el choque del chorro de aire que sale por la tobera (7) contra la placa de rebote (6); todo se muestra en la figura 86.

Figura 86. Partes de un convertidor I/P



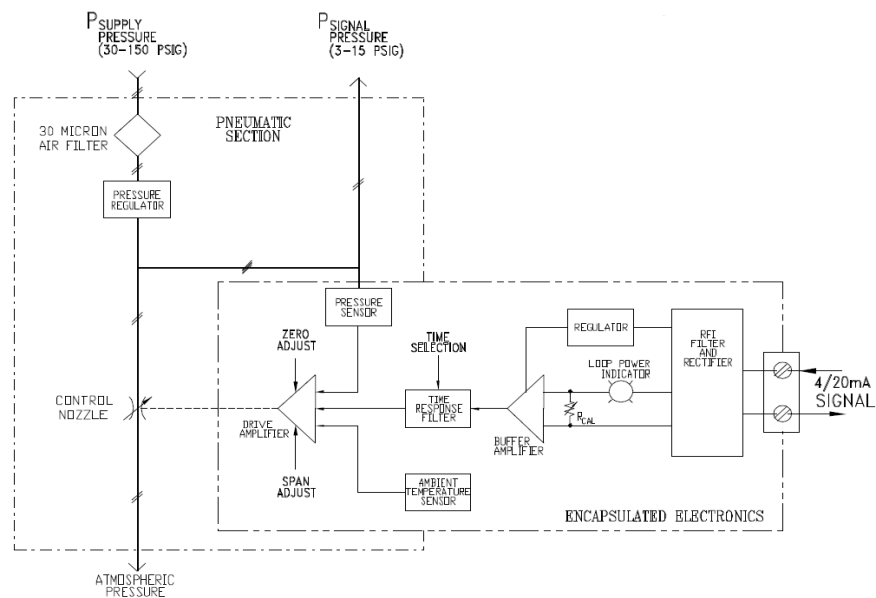
Fuente: <http://www.scribd.com/doc/56115613/Convertidor-IP>. Consulta: marzo de 2012.

El aire de la tobera se toma de la salida neumática (*output 36*). Gracias al resorte *offset*, se dispone ya de una presión de salida de aproximadamente 100 mbar, con una señal de entrada de 0 mA. El aire de alimentación (*supply 8*) fluye hacia la cámara inferior y un volumen determinado hacia la salida.

Si la corriente aumenta, la placa de rebote se acerca a la tobera. La fuerza de la presión dinámica resultante presiona la membrana (10) y el casquillo del obturador (9) hacia abajo. Con esto puede llegar más aire a la cámara inferior. El volumen de aire que pasa aumenta hasta que las fuerzas en la membrana estén equilibradas. Si la corriente disminuye, se invierte el sentido de actuación. La presión dinámica producida por la tobera y la placa de rebote bajan.

La membrana es presionada hacia arriba, libera el casquillo del obturador y abre escape (*exhaust*) hasta que las fuerzas en la membrana vuelvan a estar en equilibrio. Por lo general estos convertidores tienen una tarjeta de circuito electrónico; el circuito contiene un sensor de presión de estado sólido que monitoriza la presión de salida y es parte de una red electrónica de realimentación.

Figura 87. Diagrama eléctrico del convertidor I/P



Fuente: http://www.vrc-usa.com/images/pdf/vrc_manual.pdf. Consulta: marzo de 2012.

La capacidad de autocorrección proporcionada por la combinación de sensor/circuito permite que el transductor produzca una señal de salida muy estable y con buena respuesta. Todos los componentes activos mecánicos y eléctricos del transductor I/P están incorporados en un solo módulo que se puede reemplazar en campo, el cual se llama conjunto final del módulo.

El conjunto final del módulo contiene la tarjeta del circuito electrónico, el conjunto piloto/actuador y la etapa amplificadora; en la figura 87 se puede apreciar el diagrama electrónico completo del convertidor I/P. En la tabla XI están tabuladas las especificaciones técnicas del convertidor I/P que se usó para el proyecto.

Tabla XI. **Especificaciones técnicas del convertidor I/P utilizado**

Type 1000 Transducers		Type 1000 General Purpose
Supply Pressure Range		3 PSIG (0.2 BAR) above max. output to 100 psig (7 BAR)
Supply Pressure Sensitivity		±0.15% of span per 1.5 PSIG (0.1 BAR)
Linearity (terminal based)		<1.0% of span
Repeatability		<0.5% of span
Hysteresis		<1.0% of span
Minimum Flow Rate at Midrange 100 PSIG / 7 BAR		12 SCFM (339 SLPM)
Exhaust Capacity @ 5 psig (0.4 BAR) above setpoint		2 SCFM (56.5 SLPM)
Air Consumption (max) at Midrange		0.1 SCFM (2.8 SLPM)
Port Size (pneumatic / electric)		1/4 NPT and 1/2 NPT
Size	inches	2-1/8 X 2-1/8 X 4
	mm	54 X 54 X 101
Weight		2.1 lb. / 0.95 Kg

Fuente: <http://www.marshbellofram.com/bellofram-pcd/files/2012/07/Type1000.pdf>.

Consulta: marzo de 2012.

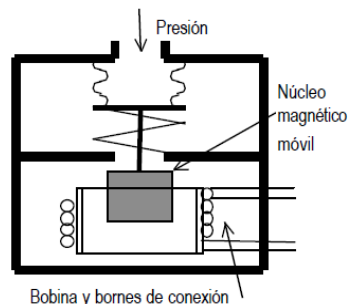
7.5. Sensor de presión

La mayoría de estos sensores se basan en la medición de la deformación o desplazamiento que la presión ejerce en una membrana elástica. Para manómetros, un lado del diafragma se expone a la presión ambiente y el otro a la del proceso. Para mediciones diferenciales, ambos lados se exponen a las presiones a medir. El diafragma debe ser capaz de soportar la exposición al fluido a medir.

7.5.1. Transductores magnéticos de inductancia variable

El desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de esta 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 fem de autoinducción se opone a la tensión 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 fem de autoinducción (ver figura 88).

Figura 88. Transductor magnético de inductancia variable



Fuente: <http://www.ingelec.uns.edu.ar/lmeii2774/docs/LME2-NC01-SAD-Ap1-transd.PDF>.

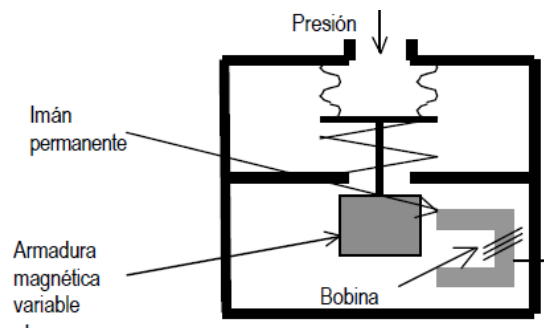
Consulta: marzo de 2012.

Estos transductores son bastante lineales, y pequeños, de construcción robusta y no precisan ajustes críticos en el montaje. Su precisión es del orden de +/- 1%.

7.5.2. Transductores magnéticos de reluctancia variable

Un imán permanente o un electroimán, crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético (figura 89). 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. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es por lo tanto proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

Figura 89. Transductor magnético de reluctancia variable



Fuente: <http://www.ingelec.uns.edu.ar/lmeii2774/docs/LME2-NC01-SAD-Ap1-transd.PDF>.

Consulta: marzo de 2012.

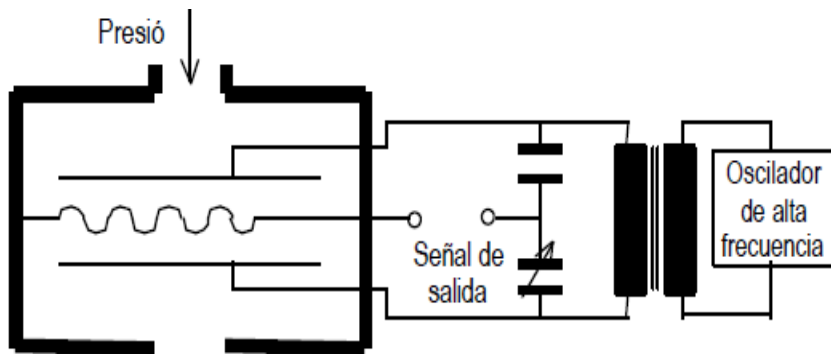
Estos transductores son más precisos que los de inductancia variable, pero también requieren más cuidados en su montaje y son sensibles a las vibraciones y a la temperatura.

7.5.3. Transductores capacitivos

Se basan en la variación de la capacidad que se produce en un capacitor 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 (figura 90). De este modo se tienen dos capacitores: uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos tipo puente de Wheastone, alimentados con corriente alterna.

Estos transductores son de tamaño pequeño y construcción robusta. Su señal de salida es débil y debe ser amplificada antes de ser medida. Son sensibles a las variaciones de temperatura y requieren de un ajuste cuidadoso de los circuitos oscilantes y de los puentes de medida. Su rango va de 0.05 – 5 a 0.05 - 600 Kg/cm y su precisión es del orden de ± 0.2 a $\pm 0.5\%$.

Figura 90. Transductor capacitivo



Fuente: <http://www.ingelec.uns.edu.ar/lmeii2774/docs/LME2-NC01-SAD-Ap1-transd.PDF>.

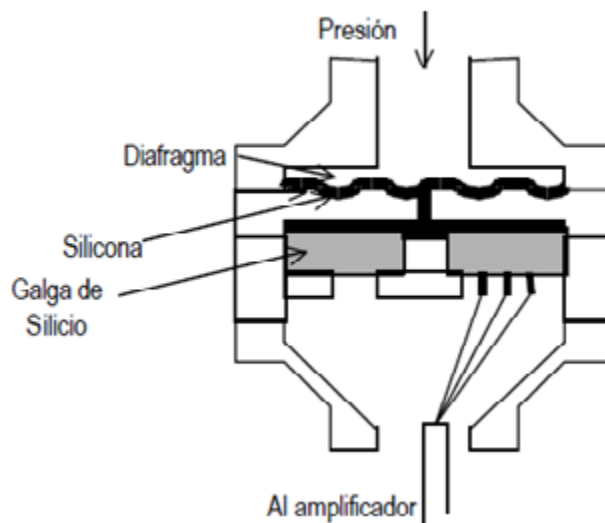
Consulta: marzo de 2012.

7.5.4. Sensores basados en celdas de esfuerzo

Los sensores modernos basados en celdas de esfuerzo consisten en un elemento de silicio situado dentro de una cámara que contiene aceite siliconado, que está en contacto con el proceso a través de un diafragma sensible (figura 91). El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio, en cuyo seno se difunde boro para formar varios puentes de Wheastone, constituyendo así una celda de esfuerzo autocontenida.

El espesor del sensor determina el rango de medida del transductor. El intervalo de medida de estos transductores llega hasta los 1600 Kg/cm con una precisión de $\pm 0.2\%$. Como todos los semiconductores, son sensibles a las variaciones de temperatura.

Figura 91. Sensor a base de celdas de esfuerzo



Fuente: <http://www.ingelec.uns.edu.ar/lmeii2774/docs/LME2-NC01-SAD-Ap1-transd.PDF>.

Consulta: marzo de 2012.

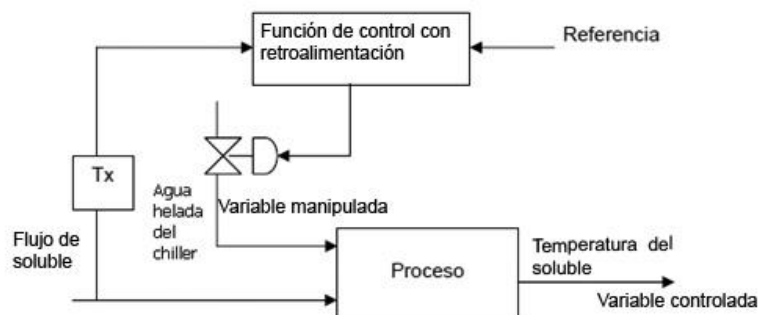
7.5.5. Transductores piezoeléctricos

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. Son elementos de pequeño tamaño y de construcción robusta y su respuesta en frecuencia supera 1 MHz. Son sensibles a los cambios de temperatura y normalmente requieren de un amplificador, ya que su señal de salida es bastante débil.

7.6. Programación de las rutinas en e PLC

Se agrega la rutina de control PID, cuya variable manipulada es la apertura de la servoválvula del agua helada que suministra el *chiller*, cuya apertura depende del nivel de perturbación del flujo de entrada del soluble, el cual será censado por un sensor de presión; y como variable controlada (variable de proceso), la temperatura del soluble a la salida del intercambiador de calor; gráficamente se puede ver en la figura 92.

Figura 92. Esquema del control PID anticipado



Fuente: elaboración propia.

El sensor de presión genera continuamente una señal que representa el flujo real del soluble alimentado al intercambiador.

En el PLC, esta señal es sustraída del valor ajustado que representa la temperatura deseada. Si estos valores son iguales, la posición real de la válvula es correcta, y el PLC no cambiará su salida.

Suponiendo ahora, si el valor real de la presión del soluble cambia por debajo del valor de referencia, el PLC cambiará su salida en la dirección que hace cerrar la válvula, lo que elevará la temperatura de salida antes que la perturbación afecte el proceso.

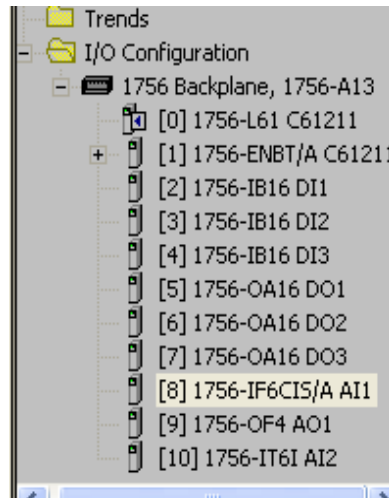
Inversamente, si la presión real sube por encima del valor deseado, el PLC cambiará su salida en la dirección que hace abrir la válvula, bajando la temperatura de salida y adelantándose a la perturbación.

Mientras el control realimentado es reactivo por naturaleza, y responde al efecto de una perturbación, los esquemas *feedforward* responden directamente a las perturbaciones y, por lo tanto, ofrecen un control mejorado al anticipar el control sobre la apertura/cierre de la válvula.

7.6.1. Programación PID

Se carga el programa de la máquina y al expandir el árbol de configuración del *rack* se puede ver en el *slot* 8, que hay una tarjeta de entrada análoga (figura 93).

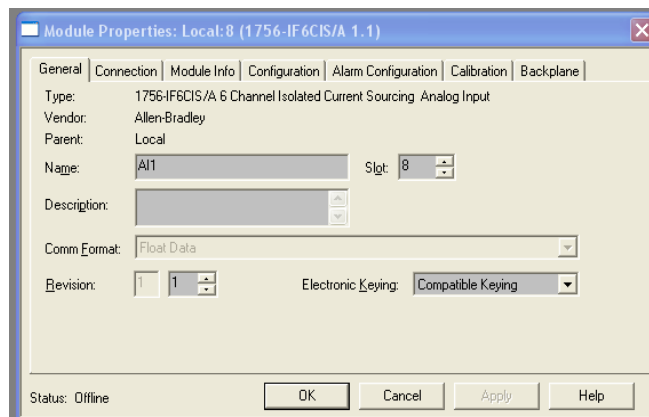
Figura 93. Configuración *rack* del PLC



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Ahora al hacer doble click, desplegará la descripción general de la tarjeta, que para este caso es una tarjeta de entrada análoga de corriente de 6 canales, figura 94.

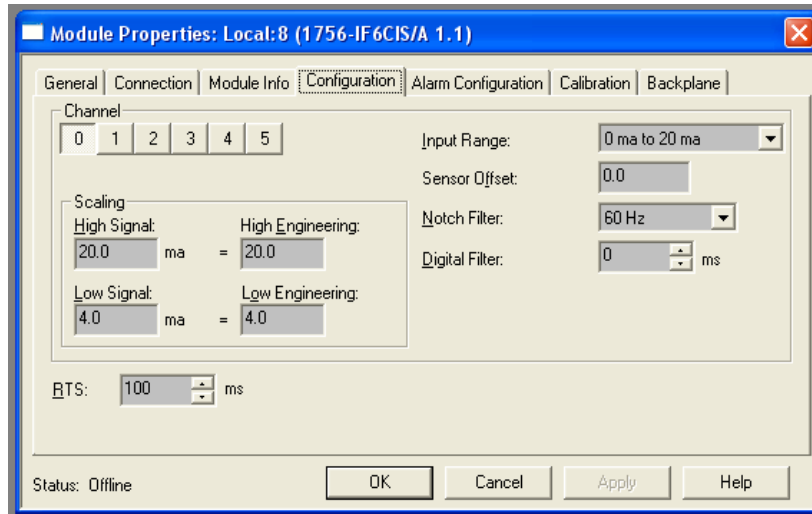
Figura 94. Propiedades de la tarjeta del *slot* 8



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Ahora se elige la pestaña configuración, y se obtendrá la siguiente ventana de la figura 94.

Figura 95. Pestaña de configuración de la tarjeta



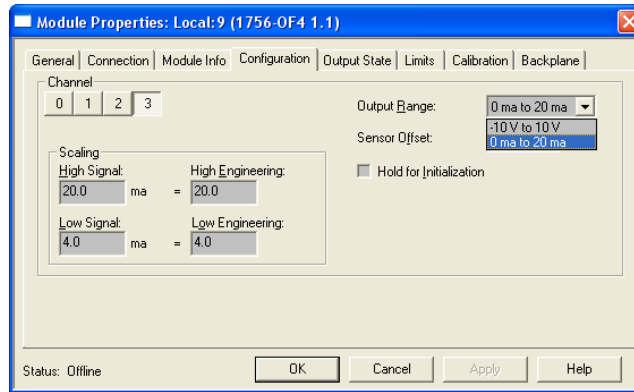
Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Como se puede ver, en esta ventana se va a elegir el canal a configurar, como el rango de entrada en corriente y el escalado de la señal; puede agregarse un *offset* si se necesita y la frecuencia del filtro de la señal.

Todo lo anterior según la necesidad o experiencia del usuario; se hace uso del canal 1 como fuente de corriente, al hacer uso de un sensor de presión que entrega una salida de 4-20 mA.

Para el caso de salida que controla la servoválvula, se hace uso del canal 3 del *slot* 9; como se ve en la figura 96, es una tarjeta de salida análoga, que puede ser corriente o voltaje; para este caso se elige la salida como corriente 4-20 mA.

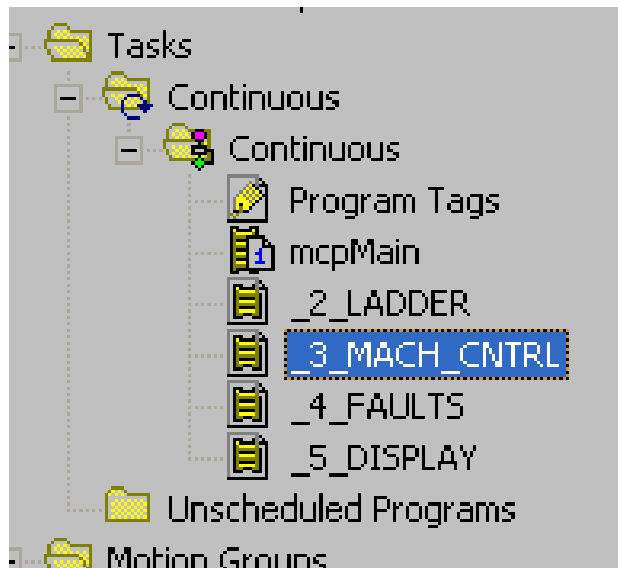
Figura 96. **Canal 3 del slot 9 que controla la servoválvula**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Ahora se expande el árbol de las rutinas y se elige la rutina resaltada en azul “_3_MACH_CNTROL”, como se ve en la figura 97.

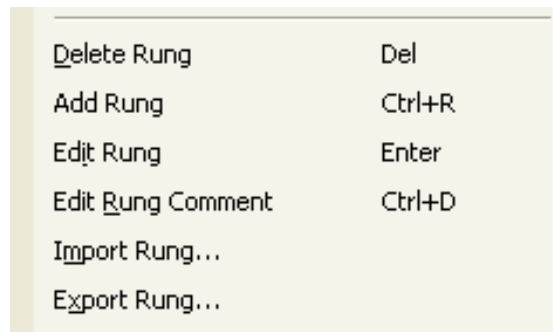
Figura 97. **Rutina elegida para agregar control PID**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Del lado derecho aparecen las líneas de programación, moviéndose hacia el final; se le da *click* derecho y aparece un menú, donde se elige agregar escalón (Ctrl+R), como se ve en la figura 98.

Figura 98. **Para agregar una nueva línea de instrucción**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

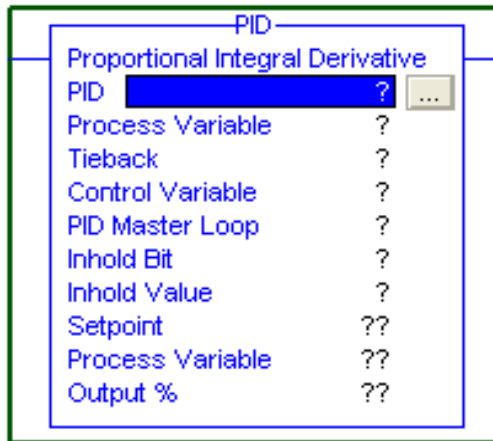
Ahora, en la parte superior está el menú de instrucciones; se busca la pestaña de funciones especiales; aquí se presiona sobre el botón PID (figura 99), lo que hará que en la nueva línea aparezca el bloque PID, como se ve en la figura 100.

Figura 99. **Menú de instrucciones especiales**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

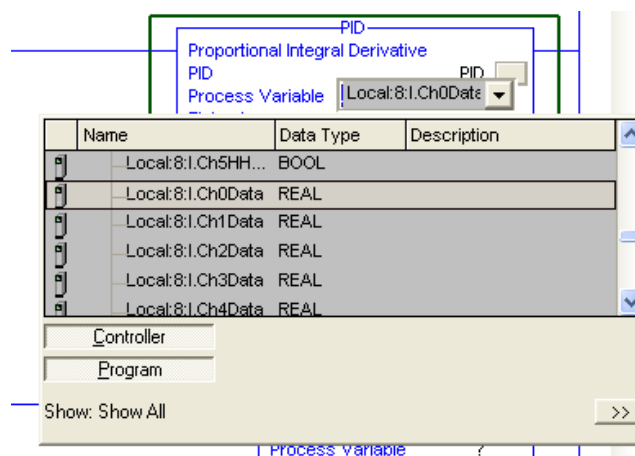
Figura 100. Instrucción especial PID, sin valores



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Ahora se pincha sobre “*Process variable*” y aparece una ventana donde se busca la variable que será la presión hidráulica de entrada del soluble, que corresponde al canal 0 del *slot* 8; esto se ve en la figura 101.

Figura 101. Selección de la variable de control

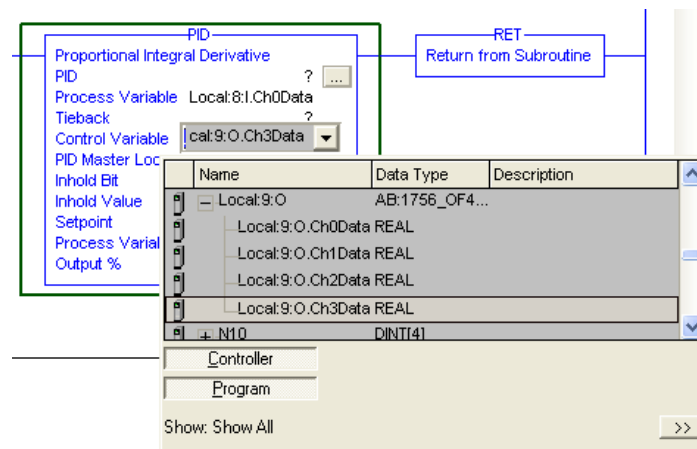


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Puede causar confusión, debido a que en los parámetros del bloque PID, aparece como variable de control lo que se ha conocido como variable manipulada (apertura de la válvula), también se ha dicho que la variable de proceso es lo mismo que la variable de control; esto es únicamente una discrepancia entre la literatura y el *software*, pero no debe haber confusión, ya que están definidos como entrada (proceso) y la otra como salida (manipulada), en el bloque de configuración PID.

En la figura 102 se ve la elección de la variable manipulada que corresponde al canal 3 del *slot* 9.

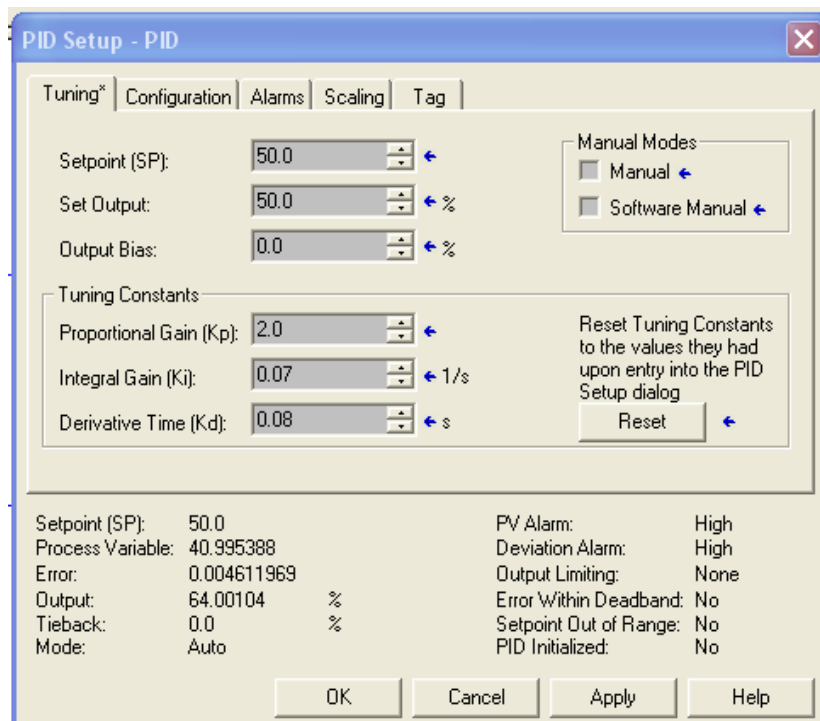
Figura 102. Elección de la variable manipulada



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Ahora si se pincha sobre el botón PID, aparece el menú que hace todo el trabajo de ajuste de los parámetros del controlador PID, vía software, figura 103; el cual es más completo y flexible, comparado con un controlador PID.

Figura 103. Parámetros del control PID



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

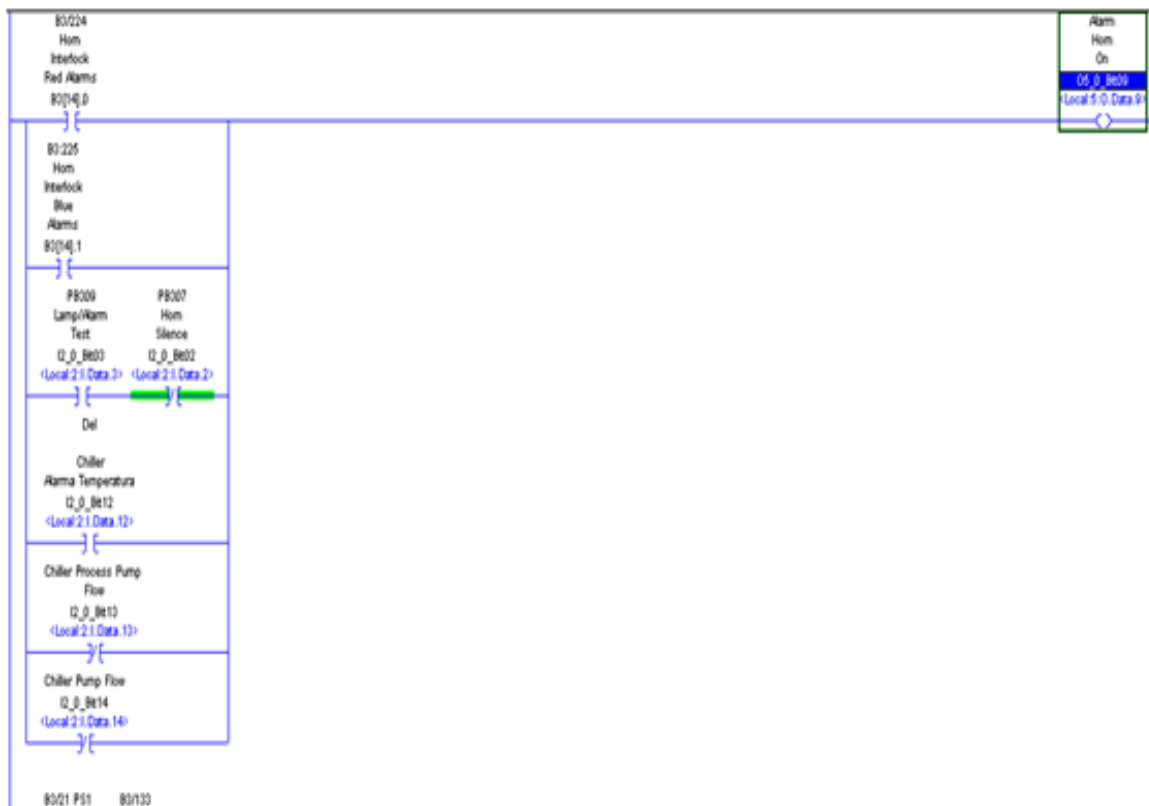
Como puede verse en la pestaña de preparación del inglés "tuning", es donde se ajusta el *setpoint* (SP), es decir el valor de presión en psi que se necesita mantener constante a la entrada del intercambiador, lo cual repercutirá en la temperatura del soluble a la salida (variable de proceso), dado que existe una correlación entre presión y temperatura.

Luego, abajo pueden verse los botones de las constantes proporcional, integral y derivativo, para hacer el control completamente PID. La ventaja del software es que se puede usar lo que se necesita, es decir se le puede dejar completamente proporcional si se dejan en cero las casillas de las últimas constantes.

7.6.2. Alarma de falta agua helada

Por seguridad en caso de falla en el suministro de agua helada del *chiller* o temperatura fuera del rango, se agregaron dos contactos que son el bit 15 y 12 del slot 2, de una tarjeta de entrada digital; los cuales activan la sirena para avisar al operador del problema, esto se ve en la figura 104.

Figura 104. **Contactos para alarmas de falta de agua helada o fuera de temperatura de trabajo**



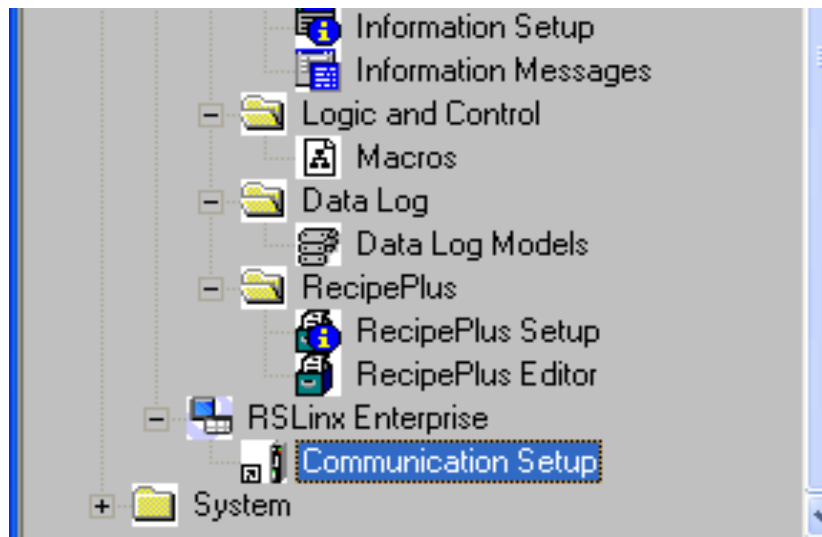
Fuente: software de programación, Envases de Centro América.

7.7. Creación de pantallas HMI (*human machine interface*)

Para poder visualizar el proceso se crearon pantallas para que el operador pueda monitorear la presión del soluble a la entrada y temperatura del mismo a través de la interfaz hombre-máquina (HMI por sus siglas en inglés). Para esto se usó el software FactoryTalk View Studio de Rockwell, versión 5.1.

Después de cargar el programa, lo más importante es configurar la ruta de comunicación con el PLC, para poder tomar los valores de las etiquetas que mostrarán, que pueden ser valores como el de temperatura, presión, etc.

Figura 105. **Configuración de comunicación del *FactoryTalk Studio***

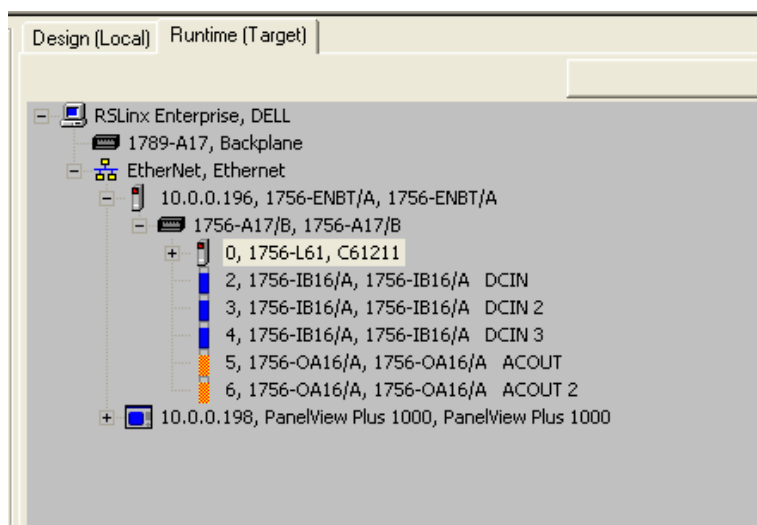


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Dependiendo del valor de la etiqueta también pueden disparar un mensaje de aviso o alarma; estos dos últimos tienen alta jerarquía, ya que sin importar qué esté mostrando la pantalla, un mensaje de aviso o alarma se sobrepone en la misma.

Para esto, en la esquina inferior izquierda se ve la opción “*Communication Setup*”, se da doble click, y muestra otra ventana donde se puede ver toda la red Ethernet de los PLC; se busca el PLC del cual se tomarán los valores de las *tags* a ser usadas (dirección IP), figuras 105 y 106.

Figura 106. **Despliegue de toda la red Ethernet de PLC**



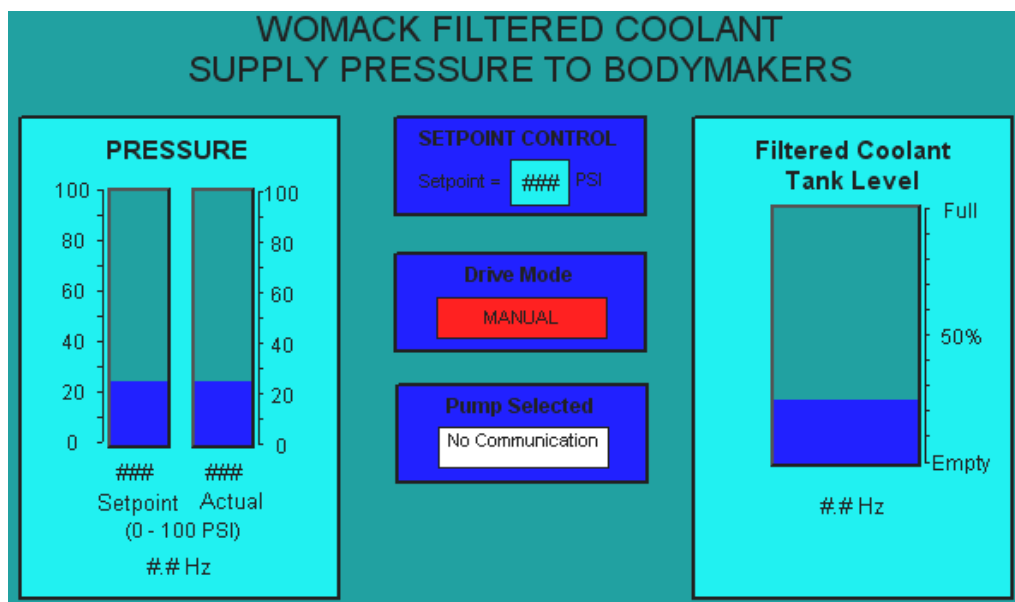
Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Ya establecida la comunicación se crea la pantalla, cuyo única restricción es la creatividad; se muestra la siguiente que se usa para el *setpoint* de presión, a la entrada del intercambiador de calor (figura 107).

Como puede verse en la figura 107, los valores de las presiones solo muestran el símbolo numeral; al hacer doble click sobre ellos, se muestra un menú, del cual se elige la opción “*Connection*”.

Está otra ventana (figura 108), donde se despliegan todas las *tags* del programa; se busca la que corresponde al valor de la presión leída; en este caso sería la *tag* “local:8:I.CH0.data”, esta corresponde al canal 0 del *slot* 8, que es una entrada análoga de corriente.

Figura 107. **Pantalla de supervisión del valor de presión a la entrada**

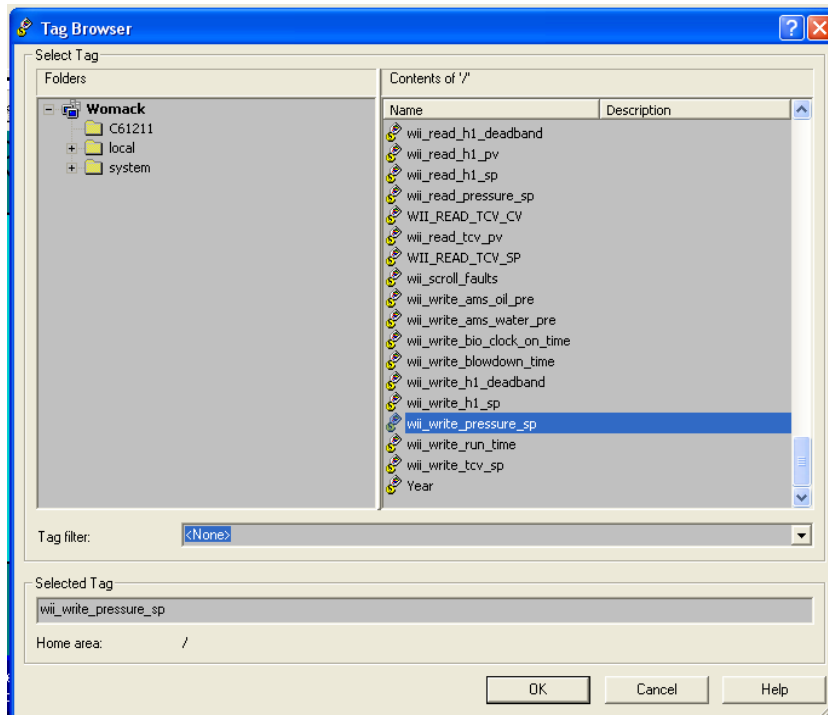


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Para este caso tiene un alias en el PLC, el cual es “wii_read_h1_PV”; se elige y al ejecutar y crear la pantalla, es esta la que buscan en el PLC para desplegar el valor en el HMI.

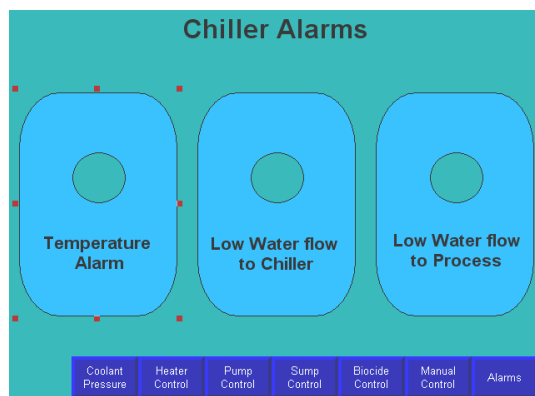
En la figura 109 se muestra otra pantalla que es de las alarmas de falta de flujo de agua del *chiller* o fuera del rango de temperatura permitido.

Figura 108. Listado de tags que pueden usarse en el HMI



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

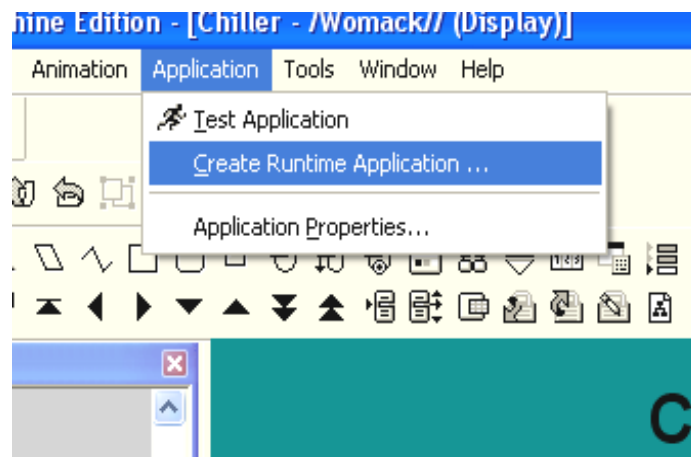
Figura 109. Pantalla de aviso de alarmas



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Una vez terminado y probado el diseño de pantallas, llega el momento de crear el archivo ejecutable que se descargará directamente en el HMI. Para esto, como se ve en la figura 110, se elige la opción “crear aplicación”, y después de unos minutos creará un archivo con el nombre que se le asigna, de extensión *mer*, el cual es el archivo que se ejecuta en el HMI.

Figura 110. **Creación del programa de pantallas**

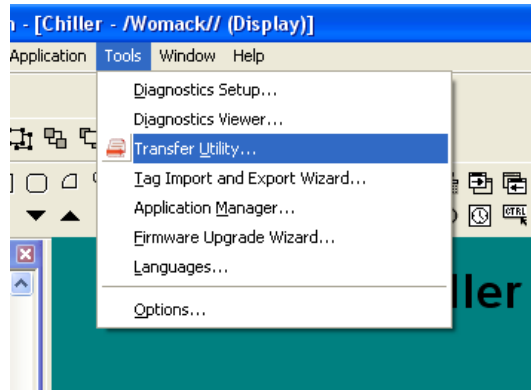


Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

Ahora toca descargar la aplicación de pantalla en el HMI correspondiente. Para esto se hace uso del botón de herramientas y se elige la utilidad de transferencia (figura 111). Seguidamente se muestra toda la red de PLC, y como se sabe, el HMI tiene una dirección IP; se busca la que corresponde y sobre esta se le da “descargar”.

En el HMI, se va a las opciones de utilidades y se busca la de cargar aplicación, esta muestra el listado de programas en memoria, se carga el propuesto, se ejecuta y empieza a trabajar con las nuevas pantallas programadas.

Figura 111. **Transferencia de programa de pantallas**



Fuente: Software de programación, Envases de Centro América.

7.8. **Calibración de la servoválvula y de las entrada análoga del PLC**

Para realizar esto, se uso un calibrador de procesos multifunción, Fluke 725, figura 112; con el cual se pueden simular salidas de corriente de 4-20 mA, que son de mucha utilidad para ajustar y calibrar la servoválvula.

Figura 112. **Calibrador de procesos Fluke 725**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

Fue necesario hacer ajustes en los potenciómetros de la servoválvula , para dejar completamente cerrada la válvula a 4 mA y a 20 mA, completamente abierto. Todo esto con la ayuda del Fluke 725, ajustado como fuente de corriente se le aplicó al mando de la servoválvula para después ajustar los potenciómetros, hasta hacer los ajustes correctos de apertura y cierre de la válvula; se puede ver en la figura 113 la conexión del calibrador al mando de la válvula.

Figura 113. **Ajustando la servo válvula**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

Con este instrumento también se ajustaron y escalaron los valores entre la presión de 50 psi a la entrada del soluble y la temperatura del soluble a 45°C, a la salida del intercambiador de calor.

Esto se realizó ya instalado el Fluke 725; como fuente de corriente se conectó a la tarjeta de entradas análogas, y luego con la tarjeta de salida análoga se conectó a la servoválvula; después de varias pruebas se logró sintonizar el funcionamiento que dio un valor estable en la temperatura del soluble, correlacionado con la presión del soluble a la entrada del intercambiador de calor.

Todos estos ajustes se realizaron en un banco de pruebas donde se contó con un *rack* completo con tarjetas de entradas y salidas análogas y un procesador Logix5000, como se puede ver en las figuras 114 y 115.

Figura 114. **Tarjeta de salida análoga del banco de pruebas**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

Figura 115. **PLC Logix5555, utilizado para ajustes del PID anticipado**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

En el banco de pruebas, en línea con el software Logix5000, se programaron las pruebas antes de ser montado directamente en la máquina. Todo esto fue una muy valiosa ayuda para hacer las simulaciones, junto con el Fluke 725. Esto para evitar pérdidas de tiempo al cometer errores y parar la máquina en funcionamiento, lo cual no es permitido.

7.9. Instalación final proyecto

A continuación se muestran fotos del proyecto ya montado y trabajando; en la figura 116 se ve el transmisor de presión al plc, el cual medirá las perturbaciones en el soluble.

Figura 116. **Transmisor de presión, para censar la señal de presión del soluble**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

En la figura 117 se ve la servoválvula ya instalada; es la variable manipulada, donde se puede ver la tubería del *chiller*, el cual está forrado de color azul; cuando la servoválvula se cierra completamente, entra a la derecha y sale a la izquierda sin pasar por el intercambiador de calor; por lo general siempre permanece abierta $\frac{1}{4}$ de apertura total, o sea siempre está modulada la apertura.

Figura 117. **Servoválvula modulando el flujo de agua helada**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

Figura 118. **Instalación del *bypass* a la salida de las bombas del soluble**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

En la figura 118 se puede apreciar en tubería color gris la llave de *bypass*, para permitir el paso directo del soluble a las máquinas, en caso de fallo de la servoválvula. En la figura 119, se muestran las tres bombas que alimentan el soluble a las máquinas y de lado izquierdo, se aprecia la servoválvula; más adelante se ve el intercambiador de calor.

Figura 119. **Bombas que envía el soluble a las máquinas después de pasar por el intercambiador de calor**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

En la figura 120 se ven las tres tarjetas análogas usadas, que son entrada y salida análogas, respectivamente, y la última que es especial para entrada de termopares.

Figura 120. **Tarjetas de entradas y salidas análogas**



Fuente: Instalaciones de Envases de Centro América.

7.10. Costos

En la tabla XII se da el costo aproximado del montaje del proyecto en dolores. Costo que fue pagado por la empresa, cuyo beneficio de retorno se refleja en la seguridad del operador al hacer ajustes mecánicos en las máquinas, formadoras de bote. Ajustes que se hacen ahora de una forma más cómoda y rápida, con una temperatura agradable de trabajo, evitando quemaduras al operador.

Junto con esto se tiene menor desgaste en la herramienta (punzón y anillos) que forman el bote, haciendo menos cambios de estos, y una formación de pared de los botes más uniforme, lo que mejora la calidad del mismo.

Tabla XII. **Costos del proyecto**

Descripción	Precio
Trabajo de contratistas	\$ 4 500,00
Intercambiador de calor	\$ 13 136,39
Servoválvula	\$ 2 095,00
Termopar	\$ 112,50
Total	\$ 19 843,89

Fuente: elaboración propia.

Respecto del sensor de presión, no se compró por estar ya uno montado, solo se reutilizó la señal para la función PID. Estos costos al cambio del día, serían aproximadamente de Q.158 751,12.

Los costos de programación y creación de pantallas fueron *ad honorem*; la empresa proporcionó la computadora y el software para el desarrollo de la programación.

CONCLUSIONES

1. El implementar un proceso PID anticipado, es demasiado oneroso para cualquier empresa común, por la inversión económica que se hace en equipo especializado y asesoría externa.
2. Contar con recursos de equipo especializado de laboratorio electrónico para hacer pruebas y simulaciones de los diferentes procesos de control, facilita en gran manera simular y obtener resultados de los procesos reales a ser controlados.
3. Trabajar con un PLC real, en un banco de pruebas donde se puede montar y desmontar diferentes módulos de señales de entrada y salida análogas, facilita de gran manera el aprendizaje de los diferentes ajustes que son necesarios para sintonizar y estabilizar un sistema de control y con esto evitar cometer errores en el montaje final.
4. Aun siguiendo los pasos sugeridos por la literatura para hacer los ajustes del proceso PID, en la práctica no siempre se obtienen los resultados deseados, terminando a prueba y error los ajustes, para obtener los resultados requeridos.
5. Una vez sintonizado el proceso, se mantiene constante en el control de la temperatura, pudiendo cambiar el *set point* a voluntad, desde el HMI de la máquina.

6. El proyecto implicó varias ramas técnicas propias de ingeniería, de las que se pueden mencionar: informática, mecánica, hidráulica, eléctrica y electrónica.
7. En las pruebas hechas, se comprobó que aun dejando el control PID con las constantes integral y derivativa a cero, es decir un control puramente proporcional, dio muy buenos resultados.
8. Es importante usar cable del termopar adecuado, para evitar valores erráticos en la lectura de la temperatura.
9. De este proyecto surgieron más sugerencias para implementar métodos de control en otras máquinas, por ejemplo, control de vacío en una de las impresoras.

RECOMENDACIONES

1. Estando ajustado y trabajando el control PID, es necesario y adecuado programar en los paros de mantenimiento la limpieza del intercambiador de calor, para evitar la acumulación de suciedad en las placas, degradando el desempeño del mismo.
2. Implementar además del control PID anticipado, un control PID realimentado para tener el control completo sobre la temperatura y no solamente por perturbaciones a la entrada.
3. Después de haber estudiado el manual del VFD, se encontró que estos también tienen la capacidad de trabajar como controlador PID; es decir, en lugar de la servoválvula, se modula la velocidad del VFD, ahorrando en la inversión de la misma. Entonces se podría regular el flujo de soluble en lugar del flujo de agua helada del *chiller*, aplicado en esta máquina o en otra.
4. Incentivar el intercambio de capacitación entre estudiantes de las diferentes Facultades de la Universidad de San Carlos, sobre el desarrollo de proyectos como este, que es de mutuo beneficio.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACEDO SÁNCHEZ, José. *Control avanzado de procesos*. 2a ed. España: Díaz Santos, 2006. 515 p.
2. GARCÍA SIERRA, J. *Las válvulas en los sistemas hidráulicos*. Universidad Politécnica de Valencia, 1997. 120 p.
3. GIL NOBAJAS, Jorge Juan; RUBIO DÍAZ-COROVÉS, Ángel. *Fundamentos de control automático de sistemas continuos y muestreados*. 2a ed. España: Unicopia, C.B., 2010. 215 p.
4. HÄGGLUND, Tore; ÄSTRÖM, Karl. *Control pid avanzado*. España: Pearson Educación, 2009. 488 p.
5. JARAMILLO, O. A. *Intercambiadores de calor*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2007. 33 p.
6. PÉREZ GARCÍA, Alfonso. *Curso de instrumentación*. [en línea] <http://librosdeelectronica.blogspot.com/2011/09/curso-de-instrumentacion-alfonso-perez.html>. [Consulta: 15 de julio de 2013]

7. ROCKWELL ATOMATION. *Factory talk view machine edition user's guide*. [en línea]. <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/viewme-um004_-en-e.pdf>. [Consulta: 20 enero de 2013].
8. ROCKWELL ATOMATION. *Panel view plus terminals user manual*, 2008. [en línea] <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/2711p-um001_-en-p.pdf>. [Consulta: 20 enero de 2013]
9. ROCKWELL ATOMATION. *Power flex 70 user manual*, 2012. [en línea] <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/20a-um001_-en-p.pdf>. [Consulta: 10 enero de 2013]
10. WWW.INFOPLC.NET. *Programación control logix*, 2007. [en línea] <<http://www.infoplcn.net/descargas/36-rockwell/313-iniciacion-a-la-programacion-de-un-plc-control-logix-5500>>. [Consulta: 12 de diciembre de 2012].
11. ZUBICARAY VIEJO, Manuel. *Bombas: teoría y diseño*. 2a ed. México: Limusa, 2000. 271 p.