

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN CON UN PLC ALLEN-BRADLEY MICROLOGIX 1100, DE UN CALDERO DIDÁCTICO DE VAPOR SATURADO**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**ERNESTO JAVIER RUANO HERRERÍA**  
ernjav@gmail.com

**JOSÉ LUIS ZAMBRANO BALSECA**  
jlzam23@hotmail.com

**DIRECTOR: Ing. ÁLVARO AGUINAGA B. MSc. PhD.**  
alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

**Quito, Marzo 2009**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Ernesto Javier Ruano Herrería y José Luis Zambrano Balseca, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional.

---

Ernesto Javier Ruano Herrería

---

José Luis Zambrano Balseca

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ernesto Javier Ruano Herrería y José Luis Zambrano Balseca, bajo mi supervisión.

---

Ing. Álvaro Aguinaga B. MSc. PhD.

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi familia, la cual me ha dado cariño y comprensión durante toda mi vida. A mi madre, que ha sido mi sustento y apoyo constante a lo largo de todos estos años. A mi hermana Estefanía por su respeto y consideración. A mi padre, a mis hermanos Manny, Marie, mis cuñados y sobrinos, a la distancia, a los que siempre recuerdo y extraño. A Zoilita y Felicita que han sido como unas segundas madres para mí.

Así mismo, agradezco a todos mis amigos y amigas que han sabido brindarme su sincera amistad en los buenos y malos momentos de la vida. Hemos compartido momentos inolvidables y me han ayudado a crecer como persona.

A mis profesores, compañeros y personal de la EPN, que colaboraron en mi formación profesional y en especial al Dr. Álvaro Aguinaga, por su valioso aporte para este proyecto.

Ernesto Javier

Dedico esta tesis, el esfuerzo y todo el tiempo que en ella he invertido a mis padres, que han sabido comprenderme y apoyarme incondicionalmente a pesar de los tropiezos sufridos en mi vida profesional. A mis hermanas y mis sobrinos, que siempre han estado ahí para motivarme cuando lo he necesitado. A mis amigos, con los cuales he compartido grandes momentos a lo largo de mi vida.

Hay situaciones difíciles que se presentan en la vida que no se pueden explicar, y a pesar que el tiempo ha transcurrido los recuerdos aun están presentes en mi memoria. Afortunadamente, he podido superar todas estas adversidades gracias al amor y cariño de toda mi familia, especialmente de mis padres, que han sabido guiarme para salir adelante. Muchas gracias amados padres.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis Dr. Álvaro Aguinaga B., por su importante aporte en el desarrollo de este proyecto.

José Luis

## CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>CONTROL AUTOMÁTICO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTROL AUTOMÁTICO .....	1
1.1.1 GENERALIDADES .....	1
1.1.2 HISTORIA.....	2
1.2 SISTEMAS DE CONTROL .....	3
1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.....	3
1.2.1.1 Control en lazo abierto.....	3
1.2.1.2 Control en lazo cerrado .....	4
1.2.1.2.1 <i>Comportamiento</i> .....	5
1.2.1.2.2 <i>Función de transferencia</i> .....	6
1.2.2 ESTABILIDAD.....	6
1.2.3 CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD .....	7
1.2.4 REGULADORES PID .....	8
1.3 CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLC) .....	9
1.3.1 GENERALIDADES .....	9
1.3.2 DEFINICIÓN .....	9
1.3.3 HISTORIA.....	10
1.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS PLC .....	11
1.3.4.1 Por construcción.....	11
1.3.4.2 Por número de entradas y salidas .....	12
1.3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PLC .....	13
1.3.5.1 Ventajas.....	13

1.3.5.2 Desventajas.....	14
1.3.6 ESTRUCTURA DE UN PLC .....	14
1.3.6.1 Fuente de alimentación .....	15
1.3.6.2 CPU.....	15
1.3.6.2.1 <i>Procesador</i> .....	15
1.3.6.2.2 <i>Memoria monitor del sistema</i> .....	16
1.3.6.2.3 <i>Funciones básicas de la CPU</i> .....	17
1.3.6.3 Módulo de entradas.....	17
1.3.6.3.1 <i>Tipos de entradas</i> .....	18
1.3.6.4 Módulo de salidas.....	19
1.3.6.4.1 <i>Tipos de salidas</i> .....	21
1.3.6.5 Terminal de programación.....	22
1.3.6.6 Periféricos.....	23
1.3.6.7 Interfaces.....	24
1.3.6.8 Memoria.....	25
1.3.6.8.1 <i>Memoria interna</i> .....	26
1.3.6.8.2 <i>Memoria de programa</i> .....	28
1.3.7 FUNCIONES DEL PLC.....	29
1.3.7.1 Funciones básicas .....	29
1.3.7.2 Funciones complementarias.....	29
1.3.8 PROGRAMACIÓN .....	30
1.3.8.1 Lenguajes de programación .....	31
1.3.8.1.1 <i>Programación ladder</i> .....	31
1.3.8.1.2 <i>Mnemónico</i> .....	34
1.3.8.1.3 <i>Gráfico de orden etapa transición (GRAFCET)</i> .....	35
1.3.9 APLICACIONES .....	36

<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>37</b>
<b>INTRODUCCIÓN A LOS CALDEROS DE VAPOR.....</b>	<b>37</b>
2.1 GENERALIDADES .....	37
2.2 DEFINICIÓN DE CALDERO .....	38
2.3 CONCEPTOS TERMODINÁMICOS .....	39
2.3.1 VAPOR Y EVAPORACIÓN.....	39
2.3.2 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL VAPOR.....	40
2.4 TIPOS PRINCIPALES DE CALDEROS .....	42
2.4.1 CALDEROS PIROTUBULARES.....	42
2.4.1.1 Ventajas.....	43
2.4.1.2 Desventajas.....	43
2.4.2 CALDEROS ACUOTUBULARES .....	43
2.4.2.1 Ventajas.....	43
2.4.1.2 Desventajas.....	44
2.4.3 CALDEROS ELÉCTRICOS .....	44
2.5 COMPONENTES DE LOS CALDEROS ELÉCTRICOS.....	46
2.5.1 ELEMENTO CALEFACTOR .....	46
2.5.2 CONTROL DE PRESIÓN .....	47
2.5.3 VÁLVULA DE SEGURIDAD .....	49
2.5.3.1 Operación de la válvula de seguridad .....	50
2.5.4 CONTROL DE NIVEL DE AGUA.....	50
2.5.4.1 Flotador .....	51
2.5.4.1.1 <i>Accionamiento mecánico</i> .....	51
2.5.4.1.2 <i>Accionamiento magnético</i> .....	52
2.5.4.2 Presión diferencial .....	53

2.5.4.3 Por burbujeo .....	54
2.5.4.4 Capacitivo.....	54
2.5.4.5 Por ultrasonido .....	55
2.5.4.6 Conductivímetro .....	55
2.5.4.7 Radioactivo.....	56
2.5.4.8 Por electrodos .....	56
2.5.5 SUMINISTRO DE AGUA .....	57
2.5.5.1 Tratamiento de agua.....	58
2.5.5.1.1 Impurezas presentes en el agua .....	59
2.5.5.1.2 Tratamiento del agua cruda.....	60
2.5.6 PURGAS.....	61
2.5.6.1 Tipos de purgas.....	61
2.5.6.1.1 Purga manual.....	62
2.5.6.1.2 Purga continua.....	62
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>63</b>
<b>PARÁMETROS DE DISEÑO Y SELECCIÓN .....</b>	<b>63</b>
3.1. PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DEL CALDERO... 63	
3.2 ESPECIFICACIONES REQUERIDAS PARA EL EQUIPO..... 64	
3.3 CÁLCULOS .....	64
3.3.1 CÁLCULO DE LA POTENCIA NECESARIA PARA LLEGAR AL PUNTO DE TRABAJO SUPERIOR (80 psi) A PARTIR DEL PUNTO INICIAL (Patm).....	64
3.3.1.1 Cálculo de pérdidas sin aislante .....	69
3.3.1.1.1 Resultados .....	73

3.3.1.2 Cálculo del espesor de aislamiento .....	74
3.3.1.2.1 Resultados .....	78
3.3.2 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA PARA AGUA .....	78
3.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN .....	79
3.4.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA Y VAPOR.....	81
3.4.1.1 Tanque caldero.....	81
3.4.1.2 Aislante térmico para el tanque .....	83
3.4.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA .....	85
3.4.2.1 Bomba para agua .....	86
3.4.2.2 Accionamiento de la bomba .....	88
3.4.3 SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	90
3.4.3.1 Elemento calefactor .....	90
3.4.3.2 Fuente de alimentación de energía eléctrica .....	92
3.4.4 SISTEMA DE CONTROL.....	93
3.4.4.1 Controlador.....	93
3.4.4.2 Medidor de presión interna del tanque .....	94
3.4.4.3 Medidor de nivel de líquido.....	96
3.4.4.4 Actuador para el motor eléctrico.....	98
3.4.4.5 Actuador para la resistencia eléctrica .....	100
3.4.4.6 Actuador de sobrepresión (válvula de seguridad) .....	102
3.4.4.7 Control de caudal de entrada de agua .....	104
3.4.4.8 Control de caudal de salida de vapor .....	106
3.4.5 SISTEMA DE PURGA .....	108
3.4.5.1 Válvula para purga manual (intermitente).....	111

<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>114</b>
<b>CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO .....</b>	<b>114</b>
4.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA Y VAPOR .....	114
4.1.1 TANQUE CALDERO.....	114
4.1.1.1 Dimensiones.....	114
4.1.1.2 Procedimiento realizado para adecuación del tanque .....	115
4.1.2 AISLANTE TÉRMICO PARA EL TANQUE .....	118
4.1.2.1 Procedimiento de colocación.....	118
4.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA.....	120
4.2.1 BOMBA PARA AGUA .....	120
4.2.1.1 Bomba de engranajes externos.....	120
4.2.1.1.1 Características .....	120
4.2.1.1.2 Ventajas .....	121
4.2.2 ACCIONAMIENTO DE LA BOMBA .....	121
4.2.3 ACOUPLE BOMBA - MOTOR.....	122
4.2.4 ACOUPLE BOMBA – TANQUE .....	123
4.3 SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	124
4.3.1 ELEMENTO CALEFACTOR .....	124
4.3.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	125
4.4 SISTEMA DE CONTROL.....	125
4.4.1 CONTROLADOR .....	125
4.4.1.1 Especificaciones .....	126
4.4.2 MEDIDOR DE PRESIÓN INTERNA DEL TANQUE .....	127
4.4.2.1 Especificaciones.....	127
4.4.2.2 Modo de ajuste .....	127

4.4.3 MANÓMETRO .....	128
4.4.4 MEDIDOR DE NIVEL DE LÍQUIDO .....	129
4.4.4.1 Visor de nivel .....	129
4.4.4.1.1 Construcción y ensamblaje .....	130
4.4.4.2 Flotador .....	132
4.4.4.2.1 Dimensiones.....	132
4.4.4.2.2 Construcción .....	133
4.4.4.3 Circuito detector de oscuridad .....	134
4.4.4.3.1 Circuito de luz láser.....	135
4.4.4.3.2 Ensamblaje.....	136
4.4.5 ACTUADOR PARA EL MOTOR ELÉCTRICO .....	137
4.4.6 ACTUADOR PARA LA RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	138
4.4.7 ACTUADOR DE SOBREPRESIÓN (VÁLVULA DE SEGURIDAD).....	138
4.4.7.1 Especificaciones .....	139
4.4.8 CONTROL DE CAUDAL DE ENTRADA DE AGUA.....	140
4.4.8.1 Válvula de Globo .....	140
4.4.8.1.1 Características generales.....	141
4.4.9 CONTROL DE CAUDAL DE SALIDA DE VAPOR.....	142
4.5 SISTEMA DE PURGA .....	142
4.5.1 VÁLVULA DE COMPUERTA.....	142
4.5.1.1 Características generales.....	143
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>145</b>
<b>PROGRAMACIÓN DEL PLC .....</b>	<b>145</b>
5.1 ENTORNO DE PROGRAMACIÓN .....	145

5.2 ELEMENTOS DE LA PROGRAMACIÓN.....	147
5.2.1 ENTRADAS .....	147
5.2.2 SALIDAS.....	148
5.3 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	150
5.4 PROGRAMACIÓN LADDER DEL PLC EN EL PROGRAMA LogixPro .....	151
5.4.1 LECTURA DE LA PROGRAMACIÓN .....	152
5.4.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN.....	153
5.5 DIAGRAMA DE CONEXIÓN.....	155
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>156</b>
<b>PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>156</b>
6.1 PRUEBAS REALIZADAS .....	156
6.1.1 PRUEBA DE BOMBEO .....	156
6.1.2 PRUEBA HIDROSTÁTICA .....	156
6.1.3 PRUEBA DE RESISTENCIA DEL TUBO DE VIDRIO .....	156
6.1.4 PRUEBA DE CALENTAMIENTO.....	157
6.1.5 PRUEBA DE SENSORES .....	157
6.1.5.1 Sensores de presión.....	157
6.1.5.2 Sensores de nivel .....	157
6.1.6 PRUEBA DEL CONTROL Y PLC .....	158
6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	158
6.2.1 ANÁLISIS.....	159
6.3 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN .....	160

6.4 MEDIDAS DE SEGURIDAD .....	160
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>162</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>162</b>
7.1 CONCLUSIONES .....	162
7.2 RECOMENDACIONES .....	164
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>165</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>165</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de datos almacenados en la memoria del PLC .....	25
Tabla 1.2 Clasificación de la memoria interna del PLC .....	27
Tabla 1.3 Ejemplo de lenguaje mnemónico .....	34
Tabla 3.1 Alternativas y criterios de selección para el tanque caldero .....	82
Tabla 3.2 Asignación de valores y ponderación para la selección del tanque caldero .....	82
Tabla 3.3 Normalización de la tabla 3.2 .....	83
Tabla 3.4 Resultados obtenidos .....	83
Tabla 3.5 Alternativas y criterios de selección para el aislante térmico.....	84
Tabla 3.6 Asignación de valores y ponderación para la selección del aislante térmico .....	84
Tabla 3.7 Normalización de la tabla 3.6 .....	85
Tabla 3.8 Resultados obtenidos .....	85
Tabla 3.9 Alternativas y criterios de selección para la bomba para agua.....	86
Tabla 3.10 Asignación de valores y ponderación para la selección de la bomba para agua.....	87
Tabla 3.11 Normalización de la tabla 3.10 .....	87
Tabla 3.12 Resultados obtenidos .....	88
Tabla 3.13 Alternativas y criterios de selección para el accionamiento de la bomba .....	88
Tabla 3.14 Asignación de valores y ponderación para la selección del accionamiento de la bomba .....	89
Tabla 3.15 Normalización de la tabla 3.14 .....	89

Tabla 3.16 Resultados obtenidos.....	90
Tabla 3.17 Alternativas y criterios de selección para el elemento calefactor .....	91
Tabla 3.18 Asignación de valores y ponderación para la selección del elemento calefactor .....	91
Tabla 3.19 Normalización de la tabla 3.18 .....	92
Tabla 3.20 Resultados obtenidos.....	92
Tabla 3.21 Alternativas y criterios de selección para el medidor de presión interna del tanque .....	94
Tabla 3.22 Asignación de valores y ponderación para la selección del medidor de presión interna del tanque .....	95
Tabla 3.23 Normalización de la tabla 3.22 .....	95
Tabla 3.24 Resultados obtenidos.....	96
Tabla 3.25 Alternativas y criterios de selección para el medidor de nivel de líquido .....	97
Tabla 3.26 Asignación de valores y ponderación para la selección del medidor de nivel de líquido.....	97
Tabla 3.27 Normalización de la tabla 3.26 .....	98
Tabla 3.28 Resultados obtenidos.....	98
Tabla 3.29 Alternativas y criterios de selección para el actuador para el motor eléctrico .....	99
Tabla 3.30 Asignación de valores y ponderación para la selección del actuador para el motor eléctrico .....	99
Tabla 3.31 Normalización de la tabla 3.30 .....	100
Tabla 3.32 Resultados obtenidos.....	100
Tabla 3.33 Alternativas y criterios de selección para el actuador para la resistencia eléctrica .....	101
Tabla 3.34 Asignación de valores y ponderación para la selección del actuador para la resistencia eléctrica .....	101

Tabla 3.35 Normalización de la tabla 3.34 .....	102
Tabla 3.36 Resultados obtenidos .....	102
Tabla 3.37 Alternativas y criterios de selección para el actuador de sobrepresión .....	103
Tabla 3.38 Asignación de valores y ponderación para la selección del actuador de sobrepresión .....	103
Tabla 3.39 Normalización de la tabla 3.38 .....	104
Tabla 3.40 Resultados obtenidos .....	104
Tabla 3.41 Alternativas y criterios de selección para el control de caudal de entrada de agua .....	105
Tabla 3.42 Asignación de valores y ponderación para la selección del control de caudal de entrada de agua .....	105
Tabla 3.43 Normalización de la tabla 3.42 .....	106
Tabla 3.44 Resultados obtenidos .....	106
Tabla 3.45 Alternativas y criterios de selección para el control de caudal de salida de vapor .....	107
Tabla 3.46 Asignación de valores y ponderación para la selección del control de caudal de salida de vapor .....	107
Tabla 3.47 Normalización de la tabla 3.46 .....	108
Tabla 3.48 Resultados obtenidos .....	108
Tabla 3.49 Alternativas y criterios de selección para el sistema de purga .....	109
Tabla 3.50 Asignación de valores y ponderación para la selección del sistema de purga .....	110
Tabla 3.51 Normalización de la tabla 3.50 .....	110
Tabla 3.52 Resultados obtenidos .....	111
Tabla 3.53 Alternativas y criterios de selección para la válvula para purga manual .....	111

Tabla 3.54 Asignación de valores y ponderación para la selección de la válvula para purga manual.....	112
Tabla 3.55 Normalización de la tabla 3.54 .....	112
Tabla 3.56 Resultados obtenidos.....	113
Tabla 5.1 Descripción de las entradas .....	148
Tabla 5.2 Descripción de las salidas .....	149
Tabla 6.1 Comparación de los resultados teóricos y reales .....	159

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Representación general de un sistema de control .....	1
Figura 1.2 Sistema de control en lazo abierto .....	3
Figura 1.3 Sistema de control en lazo cerrado .....	5
Figura 1.4 Controlador Lógico Programable (PLC) .....	9
Figura 1.5 Estructura de un PLC .....	14
Figura 1.6 Representación de captadores pasivos .....	18
Figura 1.7 Representación de captadores activos .....	18
Figura 1.8 Representación de salidas a relés .....	20
Figura 1.9 Representación de salidas a triacs.....	20
Figura 1.10 Representación de salidas a transistores a colector abierto .....	21
Figura 1.11 Terminal de programación portátil.....	23
Figura 1.12 Terminal de programación compatible PC .....	23
Figura 1.13 Panel de operación .....	24
Figura 1.14 Conexión de un visualizador a un PLC.....	24
Figura 1.15 Esquema de una programación ladder .....	31
Figura 1.16 Simbología básica para la programación ladder .....	32
Figura 1.17 Esquema de contactos ladder.....	33
Figura 1.18 Conexión de una bobina .....	33
Figura 1.19 Conexión en paralelo de dos bobinas .....	33
Figura 1.20 Esquema de programación en mnemónico.....	34
Figura 1.21 Programación GRAFCET.....	35
Figura 2.1 Calderos.....	38

Figura 2.2 Zonas de ebullición .....	40
Figura 2.3 Caldero pirotubular.....	42
Figura 2.4 Caldero acuotubular .....	43
Figura 2.5 Calderos eléctricos.....	44
Figura 2.6 Diagrama de un presostato .....	48
Figura 2.7 Presostatos .....	48
Figura 2.8 Válvula de seguridad de resorte.....	49
Figura 2.9 Flotador de accionamiento mecánico.....	52
Figura 2.10 Flotador de accionamiento magnético.....	53
Figura 2.11 Medición por presión diferencial.....	53
Figura 2.12 Medidores de presión diferencial.....	53
Figura 2.13 Medición por burbujeo.....	54
Figura 2.14 Medidor capacitivo .....	54
Figura 2.15 Medidor ultrasónico .....	55
Figura 2.16 Conductivímetro .....	55
Figura 2.17 Medidor radioactivo .....	56
Figura 2.18 Electrodo de nivel .....	57
Figura 2.19 Bomba hidráulica.....	58
Figura 3.1 Diagrama energético del sistema de control .....	65
Figura 3.2 Volumen específico – temperatura del proceso .....	66
Figura 3.3 Resistencias térmicas equivalentes en el caso sin aislante .....	69
Figura 3.4 Resistencias térmicas equivalentes en el caso con aislante .....	74
Figura 4.1 Tanque de GLP de 15 kg .....	115
Figura 4.2 Válvula normalizada de tanques de GLP .....	115
Figura 4.3 Placas soldadas en el tanque con neplos .....	116
Figura 4.4 Perno soldado a la parte inferior del tanque.....	116

Figura 4.5 Base de estructura metálica para el tanque .....	117
Figura 4.6 Tanque asentado sobre la base .....	117
Figura 4.7 Vista del tanque con acoples instalados .....	118
Figura 4.8 Tanque con la primera capa de aislante (poliuretano) .....	119
Figura 4.9 Ubicación de la capa de lana de vidrio.....	119
Figura 4.10 Esquema de una bomba de engranajes.....	120
Figura 4.11 Bomba de engranajes utilizada .....	121
Figura 4.12 Motor eléctrico utilizado.....	122
Figura 4.13 Placa del motor eléctrico .....	122
Figura 4.14 Vista del acople entre el motor (izq.) y la bomba (der.) .....	123
Figura 4.15 Estructura metálica bomba - motor .....	123
Figura 4.16 Salida de la bomba / entrada al tanque.....	124
Figura 4.17 Resistencia eléctrica CAMCO .....	124
Figura 4.18 Resistencia instalada .....	124
Figura 4.19 Tomacorriente trifásico para 220 V .....	125
Figura 4.20 PLC Allen – Bradley 1100 .....	126
Figura 4.21 Resortes del presostato: (1) de rango y (2) diferencial.....	128
Figura 4.22 Presostato Square D.....	128
Figura 4.23 Presostato instalado.....	128
Figura 4.24 Manómetro .....	129
Figura 4.25 Manómetro instalado junto al presostato.....	129
Figura 4.26 Acople soldado para el visor de nivel .....	130
Figura 4.27 Codo de bronce soldado al complemento hembra de la unión universal .....	130
Figura 4.28 Acople de nylon tipo bocín .....	131
Figura 4.29 Conjunto armado del visor de nivel .....	131

Figura 4.30 Conjunto armado del visor de nivel colocado en el tanque .....	132
Figura 4.31 Lámina de bronce.....	133
Figura 4.32 Lámina de cobre colocada en el eje que le da la forma cilíndrica ...	133
Figura 4.33 Proceso de embutición de las tapas del flotador .....	133
Figura 4.34 Vista del flotador dentro del tubo de vidrio .....	134
Figura 4.35 Diagrama electrónico del circuito detector de oscuridad .....	134
Figura 4.36 Circuito detector de oscuridad armado.....	135
Figura 4.37 Diagrama del circuito de luz láser .....	135
Figura 4.38 Circuito de luz láser armado.....	135
Figura 4.39 Caja de los circuitos detectores de oscuridad .....	136
Figura 4.40 Caja de los circuitos de luz láser .....	136
Figura 4.41 Ubicación de los circuitos detectores de oscuridad y de luz láser...	137
Figura 4.42 Relés de 24 V DC.....	138
Figura 4.43 Relé de 24 V DC y 50 A utilizado .....	138
Figura 4.44 Válvula de seguridad Watts.....	139
Figura 4.45 Partes de una válvula de seguridad .....	139
Figura 4.46 Válvula de seguridad instalada .....	140
Figura 4.47 Válvula de entrada de agua montada y con válvula check.....	140
Figura 4.48 Esquema de una válvula de globo .....	141
Figura 4.49 Válvula de globo en la entrada de agua .....	142
Figura 4.50 Válvula de salida de vapor instalada .....	142
Figura 4.51 Válvula de compuerta.....	144
Figura 4.52 Esquema de una válvula de compuerta .....	144
Figura 4.53 Válvula para purga instalada .....	144
Figura 5.1 Vista del programa LogixPro .....	146
Figura 5.2 Ventana de simulación .....	147

Figura 5.3 Diagrama del sistema de control.....	150
Figura 5.4 Programación del PLC en lenguaje ladder con LogixPro .....	151
Figura 5.5 Esquema de conexiones .....	155

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A: MANUALES**

**ANEXO B: COSTOS**

**ANEXO C: ESPECIFICACIONES DE LOS PROCEDIMIENTOS DE  
SOLDADURA (WPS)**

**ANEXO D: FOTOS DEL EQUIPO**

**ANEXO E: DIAGRAMAS**

**ANEXO F: PLANOS**

## RESUMEN

Los procesos industriales tienden a fortalecerse mediante el uso de sistemas de automatización, por medio de dispositivos que faciliten el control automático. El PLC (Controlador Lógico Programable) es una poderosa herramienta que garantiza seguridad, protección y un correcto funcionamiento de un sistema susceptible a ser automatizado. De esta manera se reduce la inversión y la complejidad de un sistema de control, haciendo factible su realización en un sin número de aplicaciones industriales.

Los calderos de vapor saturado son máquinas térmicas ampliamente utilizadas en todo tipo de industrias desde hace muchos años. Son excelentes generadores de energía; se construyen en una amplia gama de tipos, formas y tamaños. Si bien su uso correcto es muy beneficioso para diversas aplicaciones, un uso inadecuado puede resultar peligroso e inclusive catastrófico. Por esta razón, en la actualidad se vienen desarrollando con fuerza sistemas automáticos para lograr un mejor desempeño del equipo y evitar cualquier tipo de situación riesgosa.

En el proceso de diseño y construcción fue necesario aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera. Para el diseño, se adoptó un modelo de cálculo adecuado que facilita posteriormente el proceso de construcción. Así mismo, resultó conveniente dar preferencia a la selección de componentes existentes en el mercado para lograr la viabilidad del proyecto. Finalmente, se detalla el proceso seguido en la construcción del equipo hasta lograr su óptimo funcionamiento.

El proceso de automatización se lo realizó utilizando un PLC (Allen – Bradley 1100), donado por el Laboratorio de Automatización Industrial. Fue necesario programarlo mediante las herramientas informáticas propias del equipo de acuerdo a las especificaciones planteadas en el proyecto. De esta manera, se logra una aplicación práctica de los conocimientos del Control Automático.

## PRESENTACIÓN

El presente trabajo fue desarrollado con el fin de motivar futuros proyectos e iniciativas en el área de la Automatización Industrial. Tiene como objetivo el Diseño, Construcción y Automatización de un Caldero Didáctico de Vapor Saturado para el Laboratorio de Automatización Industrial de Procesos Mecánicos de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Este laboratorio, recientemente implementado, constituye un avance hacia las nuevas tecnologías predominantes en la actualidad.

El proyecto muestra en sí, una aplicación real de la Automatización Industrial en el proceso de generación de vapor en un caldero eléctrico. Este equipo fue diseñado considerando su carácter didáctico como complemento en la formación académica de los estudiantes. Por tal razón, se utilizó un dispositivo de control novedoso dentro de la Facultad, como lo es, un PLC (Controlador Lógico Programable).

Una de las metas a futuro del proyecto es que el equipo construido, sea aprovechado al máximo por las próximas generaciones y sirva como una fuente educativa importante para la Institución. También se busca lograr un avance tecnológico acorde con las necesidades actuales, acompañado con un apoyo institucional para futuras iniciativas. Se espera que este proyecto haya sido un aporte valioso a esta causa.

# CAPÍTULO 1

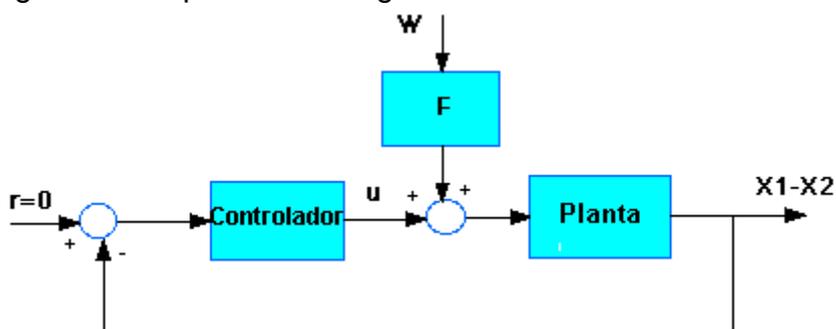
## CONTROL AUTOMÁTICO

### 1.1 CONTROL AUTOMÁTICO

#### 1.1.1 GENERALIDADES

El Control Automático o Teoría del Control es una rama de la ingeniería que se ocupa del control de un proceso en un estado determinado. Estudia el comportamiento de los sistemas dinámicos, tratándolos como cajas o bloques con una o más entradas y una o más salidas.

Figura 1.1 Representación general de un sistema de control



Fuente: <http://ib.cnea.gov.ar>

Estos sistemas representados poseen las siguientes características:

- La entrada al sistema es una señal analógica o digital que se capta en algún punto del sistema.
- Los bloques intermedios representan las diversas acciones perturbadoras que afectan a la señal así como el efecto de los reguladores de control.

- Estos efectos se suelen representar mediante las funciones matemáticas que los describen, llamadas funciones de transferencia.
- La salida del sistema se llama referencia y corresponde al valor de la señal tras actuar sobre ella las anteriores funciones de transferencia.
- Cuando una o más variables de salida de un sistema tienen que seguir el valor de una referencia cambiante con el tiempo, se necesita interponer un controlador que manipule los valores de las señales de entrada hasta obtener el valor deseado de salida.

### **1.1.2 HISTORIA**

Aunque existen diversos tipos de sistemas de control desde la Antigüedad, la formalización del dominio de la Regulación comenzó con un análisis de la dinámica del regulador centrífugo, dirigida por el físico James Clerk Maxwell en 1868 bajo el título *On Governors* (Sobre los Reguladores). Aquí describió y analizó el fenómeno de la "caza", en el que retrasos en el sistema pueden provocar una compensación excesiva y un comportamiento inestable. Se generó un fuerte interés sobre el tema, durante el cual el compañero de clase de Maxwell, Edward John Routh, generalizó los resultados de Maxwell para los sistemas lineales en general. Este resultado se conoce con el nombre de Teorema de Routh-Hurwitz.

Una aplicación notable de la Teoría de Control se encontró en el área del vuelo tripulado. Los hermanos Wright durante sus primeros vuelos con éxito el 17 de diciembre de 1903 se distinguían por su habilidad para controlar sus vuelos durante períodos sustanciales, más que por su habilidad para aprovechar el empuje de un perfil alar, que ya era conocido.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la Teoría de Control fue parte importante de los sistemas de control de disparo, sistemas de guiado y electrónicos. La carrera espacial también dependía del control preciso de las naves. Por otra parte, la

teoría de control también ha visto un uso creciente en campos como la economía y la sociología.

## 1.2 SISTEMAS DE CONTROL

### 1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Según las características y los componentes de los sistemas de control, éstos se clasifican en:

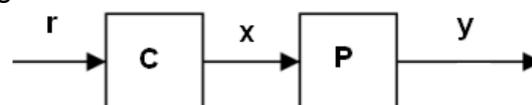
- Control en lazo abierto
- Control en lazo cerrado

#### 1.2.1.1 Control en lazo abierto

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida. El control actúa sobre las entradas del sistema a partir de valores referenciales para conseguir que las salidas tomen estos valores.

Dado un sistema a controlar, P, se emplea un controlador C, dotado con un valor referencial  $r(t)$ , el cual genera un valor de entrada  $x(t)$ , con el cual se generará una salida  $y(t)$ . Este control estima que los valores de  $y(t)$  serán los esperados, dada la actuación sobre la entrada  $x(t)$ , sin embargo, no tiene posibilidad de comprobar esta acción.

Figura 1.2 Sistema de control en lazo abierto



Fuente: Propia

Los sistemas de control a lazo abierto tienen dos rasgos característicos:

- a) La habilidad que éstos tienen para ejecutar una acción con exactitud está determinada por su calibración. Calibrar significa establecer o restablecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.
- b) Estos sistemas no tienen el problema de la inestabilidad, que se puede presentar en controles de lazo cerrado.

### **1.2.1.2 Control en lazo cerrado**

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida. Los sistemas de control de lazo cerrado se llaman comúnmente sistemas de control por realimentación (o retroacción).

Para evitar los problemas del control en lazo abierto, la teoría de control introduce la realimentación. Un regulador de lazo cerrado utiliza la realimentación para controlar los estados y las salidas de un sistema dinámico. El nombre de "lazo cerrado" hace referencia al camino que sigue la información en el sistema: las entradas al proceso afectan a las salidas del proceso. Estas salidas se miden con sensores y se procesan, una vez comparadas con la referencia, mediante un controlador o regulador; el resultado, una señal de control, se añade a la entrada del proceso, cerrando el lazo.

El control con lazo cerrado presenta las siguientes ventajas sobre el control en lazo abierto:

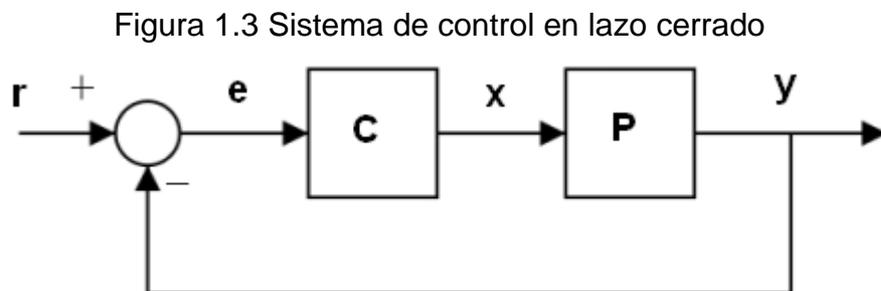
- Corrección de las perturbaciones.
- Buen comportamiento inclusive con incertidumbre en el modelo, en aquellos casos en que éste no representa perfectamente la realidad del proceso o los parámetros del modelo no se pueden medir con absoluta precisión.

- Permite estabilizar procesos inestables.
- Tolerancia a variaciones en los parámetros.

La única desventaja del control en lazo cerrado, frente al control en lazo abierto, es que el primero reduce la ganancia total del sistema. Esto lleva al uso conjunto del control en lazo abierto y cerrado, para mejorar el rendimiento.

#### 1.2.1.2.1 Comportamiento

- La salida del sistema  $y(t)$  se compara con el valor de referencia  $r(t)$ , a través de las medidas de un sensor.
- Se alimenta el error  $e(t)$  al Controlador C. Se define el error  $e(t)$  como la diferencia entre el valor de referencia y la salida del sistema.
- En función del error, el controlador modifica su salida, que es precisamente la alimentación  $x(t)$  al proceso que se está controlando, P.



Fuente: <http://es.wikipedia.org>

El sistema en la figura es un sistema sencillo de una sola entrada y una sola salida, SISO (Single Input - Single Output); los sistemas más complejos, MIMO (Multi Input - Multi Output) son bastante frecuentes. En estos casos, las variables se representan mediante vectores en lugar de valores escalares.

### 1.2.1.2.2 Función de transferencia

Si suponemos que el regulador C y el proceso P son lineales e invariantes en el tiempo (es decir, los elementos de su función de transferencia C(s) y P(s) no dependen del tiempo), el sistema se puede analizar aplicando la transformada de Laplace sobre las variables. Esto proporciona las siguientes relaciones:

$$Y(s) = P(s) X(s) \quad (1.1)$$

$$X(s) = C(s) E(s) \quad (1.2)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (1.3)$$

Despejando Y(s) en función de R(s) se obtiene:

$$Y(s) = \frac{P(s)C(s)}{1+P(s)C(s)} R(s) \quad (1.4)$$

El término anterior se denomina función de transferencia del sistema. El numerador es la ganancia en lazo abierto desde r (t) hasta y (t), mientras el denominador es uno más la ganancia del lazo cerrado. Si  $P(s) C(s) \gg 1$ , entonces Y(s) es muy parecido a R(s), lo que significa que la salida y (t) se ajusta muy bien a la referencia r (t) de control.

## 1.2.2 ESTABILIDAD

La estabilidad a menudo se define de la siguiente manera: un sistema es estable si, ante cualquier entrada acotada en un intervalo cualquiera de tiempo, la salida también está acotada. La estabilidad, así definida, se conoce como estabilidad BIBO (del inglés Bounded-Input-Bounded-Output) o Entradas Acotadas y Salidas Acotadas.

Si un sistema es estable entonces el sistema no puede "explotar". Esto quiere decir que ante una entrada finita la salida del sistema no puede tender a infinito en un intervalo todo lo amplio que se quiera. Matemáticamente, esto significa que

para que un sistema lineal causal continuo en el tiempo sea estable, todos los polos de su función de transferencia (raíces del denominador) deben estar situados en la mitad izquierda del plano complejo si se usa la transformada de Laplace, es decir, su parte real debe ser menor o igual que cero.

En este caso, si el polo tiene parte real estrictamente menor que cero es asintóticamente estable. Las variables de un sistema asintóticamente estable siempre disminuyen su valor inicial y no muestran oscilaciones permanentes, que sí aparecen cuando el polo tiene parte real igual a cero. En este último caso se dice que el sistema es simplemente estable. Un sistema estable que nunca decrece ni crece con el tiempo, y no presenta oscilaciones, es marginalmente estable: en este caso tiene polos con componente real nula y componente compleja nula. Si existen polos con parte real nula pero parte imaginaria distinta de cero, aparecen oscilaciones.

Existen numerosas herramientas para el análisis de los polos de un sistema. Algunas de ellas son procedimientos gráficos, como el estudio del lugar de las raíces, los diagramas de Bode o los diagramas de Nyquist.

### **1.2.3 CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD**

La controlabilidad y la observabilidad son los aspectos fundamentales de un sistema para poder decidir la mejor estrategia de control en el mismo. La controlabilidad es la posibilidad de llevar el sistema a un estado particular usando una señal de control adecuada. Si un estado no es controlable, entonces ninguna señal de control aplicada no podrá llevar al sistema hasta un estado controlable. La observabilidad es la posibilidad de predecir, mediante la observación de las señales de entrada y salida del sistema, el estado interno del sistema. Si el sistema se encuentra en un estado no observable, el controlador no será capaz de corregir el comportamiento en lazo cerrado si dicho estado no es deseable.

Si se estudian los estados de cada variable del sistema a controlar, cada estado indeseable de dichas variables debe ser controlable y observable para asegurar

un funcionamiento correcto del sistema en lazo cerrado. Analíticamente, si alguno de los autovalores del sistema no es observable y controlable, su efecto en la dinámica del sistema afectará al sistema en lazo cerrado y lo hará inestable. Los polos no observables no están presentes en la función de transferencia de una representación en el espacio de estados, por lo que a veces se prefieren en el análisis de sistemas dinámicos. Si un polo no observable es inestable, entonces inestabiliza el sistema y, tanto si dicho polo es controlable como si no lo es, el sistema no se podrá estabilizar (debido a que el polo no es observable).

#### 1.2.4 REGULADORES PID

El regulador PID probablemente sea el diseño de control más empleado, por ser el más sencillo. "PID" son las siglas de Proporcional-Integral-Derivativo, y se refiere a los tres términos que operan sobre la señal de error para producir una señal de control. Si  $x(t)$  es la señal de control que se envía al sistema, y  $y(t)$  es la medición que se hace de la señal de salida y  $r(t)$  es la salida deseada, el error se define como  $e(t) = r(t) - y(t)$  y un regulador PID toma el aspecto:

$$x(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \int e(t) \cdot dt + K_D \cdot \dot{e}(t) \quad (1.5)$$

El primer sumando aplica una señal proporcional al error. El segundo evalúa cual ha sido la evolución del error, y cobra más importancia cuando el error cometido es pequeño pero constante. El tercer término evalúa cual será la tendencia, y cobra más importancia cuando el error cometido se produce por instantes.

La dinámica deseada en lazo cerrado se obtiene ajustando los tres parámetros  $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$ . Este ajuste a menudo se hace iterando de manera empírica y sin conocimiento previo del modelo del sistema. A menudo se puede asegurar la estabilidad usando únicamente el término proporcional. Los reguladores PID son la clase más usada de sistemas de control: sin embargo no se pueden usar en varios casos más complicados, especialmente si se consideran sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output).

## 1.3 CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLC)

### 1.3.1 GENERALIDADES

Figura 1.4 Controlador Lógico Programable (PLC)



Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

Los PLC (por sus siglas en inglés, Programmable Logic Controller) o Controladores Lógicos Programables son dispositivos electrónicos computarizados utilizados en Automatización de Procesos Industriales. A diferencia de las computadoras en general, el PLC está diseñado para poseer múltiples entradas y salidas, soportar amplios rangos de temperatura, ser inmune a sobrecargas eléctricas y ser resistente a las vibraciones y el impacto. Los programas para el control de la operación del sistema son almacenados en una memoria no volátil o respaldada por una batería. Este equipo controla en tiempo real los procesos secuenciales, ya que los resultados generados por las salidas se producen como respuestas a las condiciones de entrada en tiempos infinitesimales.

### 1.3.2 DEFINICIÓN

De acuerdo con la definición de la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) un controlador programable es: "Un aparato electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno

de instrucciones para implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales (ON/OFF) o analógicos (1 – 5 VDC, 4 – 20 mA, etc.), varios tipos de máquinas o procesos".

### **1.3.3 HISTORIA**

Su origen se remonta a finales de la década de 1960 cuando la industria buscó en las nuevas tecnologías electrónicas una solución más eficiente para reemplazar los sistemas de control. Éstos estaban basados en circuitos eléctricos con relés, contadores, interruptores y otros componentes comúnmente utilizados para el control de los sistemas lógicos. El proceso para actualizar dichas instalaciones en la industria año tras año era muy costoso y consumía mucho tiempo, y los sistemas basados en relés tenían que ser recableados por electricistas especializados.

Los PLC fueron inventados en respuesta a las necesidades de automatización de la industria automotriz norteamericana. En 1968, GM Hydramatic (transmisiones automáticas de General Motors) ofertó un concurso para el reemplazo electrónico de los sistemas cableados. La propuesta ganadora vino de Bedford Associates de Boston, MA. El primer PLC fue designado 084, debido al número de proyecto de Bedford. Esta empresa creó una nueva compañía dedicada al desarrollo, manufactura, venta y servicio de este nuevo producto: Modicon (MOdular DIgital CONtroller). Una de las personas que trabajó en ese proyecto fue el ingeniero estadounidense Dick Morley, el cual es considerado como padre del PLC. La marca Modicon fue vendida en 1977 a Gould Electronics, posteriormente adquirida por la compañía Alemana AEG y más tarde por Schneider Electric, actual dueño.

Uno de los primeros modelos 084 que se construyeron se encuentra exhibido en la sede de Modicon en el Norte de Andover, Massachusetts. Fue regalado a Modicon por GM, cuando la unidad fue retirada tras casi veinte años de servicio ininterrumpido.

La industria automotriz es todavía una de las más grandes usuarias del PLC y Modicon todavía numera algunos de sus modelos de controladores con la terminación ochenta y cuatro. Los PLC son utilizados en muchas diferentes industrias y máquinas tales como máquinas de empaquetado y de semiconductores. Algunas marcas con alto prestigio son ABB Ltd., Koyo, Honeywell, Siemens, Trend Controls, Schneider Electric, Omron, Rockwell (Allen-Bradley), General Electric, fraz max, Tesco Controls, Panasonic, Mitsubishi e Isi Matrix Machines.

### **1.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS PLC**

Debido a la gran cantidad de tipos de PLC, es conveniente realizar una clasificación en base a aspectos relevantes y distintivos de estos aparatos. Los dos criterios más utilizados para este fin son el tipo de construcción y el número de entradas y salidas que disponga el equipo, ya que en los demás aspectos estructurales son bastante parecidos.

#### **1.3.4.1 Por construcción**

- Modular

Estos PLC se componen de un conjunto de elementos que conforman el controlador final, estos son: Rack, Fuente de Alimentación, CPU<sup>1</sup>, Módulos de E/S<sup>2</sup>. La sujeción de los mismos se hace por carril DIN<sup>3</sup>, placa perforada o sobre Rack, en donde va alojado el BUS<sup>4</sup> externo de unión de los distintos módulos.

---

<sup>1</sup> Central Processing Unit (Unidad Central de Proceso)

<sup>2</sup> Entrada/Salida

<sup>3</sup> Deutsche Industrie Normen (Normas Industriales Alemanas)

<sup>4</sup> Conjunto de líneas conductoras de hardware

De estos tipos existen desde los denominados Micro PLC que soportan gran cantidad de E/S, hasta los PLC de grandes prestaciones que permiten manejar miles de E/S.

- Semimodular

Se caracteriza por separar las E/S del resto del PLC, de tal forma que en un bloque compacto están reunidas las CPU, memoria de usuario o de programa y fuente de alimentación y separadamente las unidades de E/S. Son los PLC de gama media los que suelen tener una estructura semimodular (Americana).

- Compacto

Estos PLC tienen incorporado la Fuente de Alimentación, su CPU y módulos de E/S en un solo módulo principal y permiten manejar desde unas pocas E/S hasta varios cientos (alrededor de 500 E/S), su tamaño es superior a los Nano PLC y soportan una gran variedad de módulos especiales, tales como:

- Entradas y salidas análogas
- Módulos contadores rápidos
- Módulos de comunicaciones
- Interfaces de operador
- Expansiones de E/S

Su potencia de proceso suele ser muy limitada dedicándose a controlar máquinas muy pequeñas o cuadros de mando.

#### **1.3.4.2 Por número de entradas y salidas**

- Nano (< 64 E/S)
- Micro (64 E/S)
- Pequeño (65 a 255 E/S)
- Mediano (256 a 1023 E/S)
- Grande (> 1024 E/S)

### 1.3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PLC

Sin duda un PLC posee grandes ventajas respecto a los anteriores sistemas de control, por lo cual su uso se ha difundido en diversos campos. Como todo instrumento sujeto a ser perfeccionado posee también unas pocas desventajas. Estas ventajas y desventajas dependen en gran medida del modelo, tipo, marca e innovaciones del PLC. Sin embargo, de modo general se pueden enumerar algunas de estas:

#### 1.3.5.1 Ventajas

- La capacidad de almacenamiento del módulo de memoria es lo suficientemente grande para la mayoría de aplicaciones.
- La cantidad de materiales se reduce significativamente por lo que se facilita el desarrollo de proyectos de ingeniería.
- Se reduce el espacio de ocupación del sistema de control en general.
- Menor coste de mano de obra de la instalación.
- El mantenimiento se torna más fácil y económico que los sistemas antiguos de relés. Se aumenta la fiabilidad del sistema, al eliminar contactos móviles, estos dispositivos pueden detectar averías.
- Posibilidad de controlar varios equipos con un mismo PLC. Inclusive si algún equipo queda fuera de servicio, el PLC se puede utilizar en otra aplicación.
- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado e instalación.
- Flexibilidad de configuración y programación.
- Reducción de costos en especial en el control de sistemas complejos.
- Los avances computacionales permiten obtener un control más sofisticado.
- La confiabilidad en los componentes le permite operar durante muchos años antes de que se produzca una falla.
- Excelente respuesta a grandes variaciones en los sistemas de vapor, manteniendo la precisión en la presión de vapor.

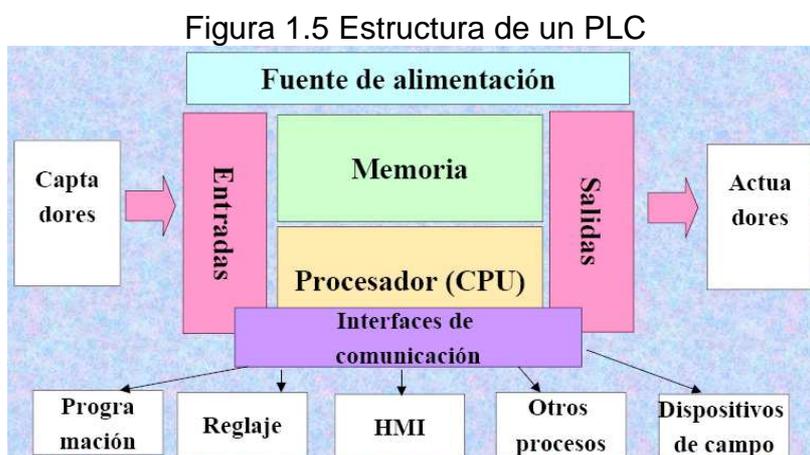
### 1.3.5.2 Desventajas

- Para la aplicación del PLC se requiere de personal técnico capacitado en la programación de este equipo, la cual puede hacerse en distintos lenguajes. Este programador debe conocer la lógica del control a realizar, los parámetros buscados y poseer habilidades informáticas.
- El coste inicial del equipo puede ser elevado mientras más sofisticado sea el PLC requerido.

### 1.3.6 ESTRUCTURA DE UN PLC

La estructura básica de un PLC está constituida por los siguientes elementos:

- Fuente de alimentación
- CPU
- Módulo de entradas
- Módulo de salidas
- Terminal de programación
- Periféricos
- Interfaces de comunicación
- Memoria



Fuente: <http://ib.cnea.gov.ar>

### **1.3.6.1 Fuente de alimentación**

Es la encargada de convertir la tensión de la red, 220 V AC, a baja tensión necesaria para el funcionamiento de los distintos circuitos del sistema del PLC. La alimentación a la CPU puede ser de 24 V DC, tensión muy frecuente en cuadros de distribución, o a 110/220 V AC. En cualquier caso es la propia CPU la que alimenta las interfaces conectadas a través del bus interno. La alimentación a los circuitos de E/S puede realizarse, según tipos, en alterna a 48/110/220 V AC o en continua a 12/24/48 V DC.

La fuente de alimentación del PLC puede incorporar una batería, que se utiliza para el mantenimiento de algunas posiciones internas y del programa usuario en memoria RAM, cuando falla la alimentación o se apaga el PLC.

### **1.3.6.2 CPU**

La CPU (Central Processing Unit) o Unidad Central de Procesamiento es el auténtico cerebro del sistema. Se encarga de recibir las ordenes del operario por medio de la consola de programación y consultando el módulo de entradas. Dependiendo de dichos estados y del programa, las procesa para enviar respuestas al módulo de salidas.

La CPU está constituida por los siguientes elementos:

- Procesador
- Memoria monitor del sistema
- Circuitos auxiliares

#### *1.3.6.2.1 Procesador*

Está constituido por el microprocesador, el reloj (generador de onda cuadrada) y algún chip auxiliar.

El microprocesador es un circuito integrado (chip), que realiza una gran cantidad de operaciones, que se puede agrupar en:

- Operaciones de tipo lógico
- Operaciones de tipo aritmético
- Operaciones de control de la transferencia de la información dentro del PLC

Para que el microprocesador pueda realizar todas estas operaciones está dotado de unos circuitos internos que son los siguientes:

- Circuitos de la unidad aritmética y lógica (ALU): Es la parte del  $\mu\text{p}^5$  donde se realizan los cálculos y las decisiones lógicas para controlar el autómata.
- Circuitos de la unidad de control (UC): Decodifica las instrucciones leídas en memoria y se generan las señales de control.
- Acumulador: Es la encargada de almacenar el resultado de la última operación realizada por la ALU.
- Flags: Indicadores de resultado, que pueden ser consultados por el programa.
- Contador de programa: Encargada de la lectura de las instrucciones de usuario.
- Bus (interno): No son circuitos en sí, sino zonas conductoras en paralelo que transmiten datos, direcciones, instrucciones y señales de control entre las diferentes partes del microprocesador.

#### *1.3.6.2.2 Memoria monitor del sistema*

Es una memoria de tipo ROM, y además del sistema operativo del PLC contiene las siguientes rutinas, incluidas por el fabricante.

- Inicialización tras puesta en tensión o reset.
- Rutinas de test y de respuesta a error de funcionamiento.

---

<sup>5</sup> Microprocesador

- Intercambio de información con unidades exteriores.
- Lectura y escritura en las interfaces de E/S.

#### *1.3.6.2.3 Funciones básicas de la CPU*

En la memoria ROM del sistema, el fabricante ha grabado una serie de programas ejecutivos, software del sistema y es a estos programas a los que accederá el microprocesador para realizar las funciones. El software del sistema de cualquier PLC consta de una serie de funciones básicas que realiza en determinados tiempos de cada ciclo. En general estas son:

- Vigilar que el tiempo de ejecución del programa de usuario no exceda de un determinado tiempo máximo. A esta función se le denomina watchdog.
- Ejecutar el programa usuario.
- Crear una imagen de las entradas, ya que el programa de usuario no debe acceder directamente a dichas entradas.
- Renovar el estado de las salidas en función de la imagen de las mismas, obtenida al final del ciclo de ejecución del programa usuario.
- Chequeo del sistema.

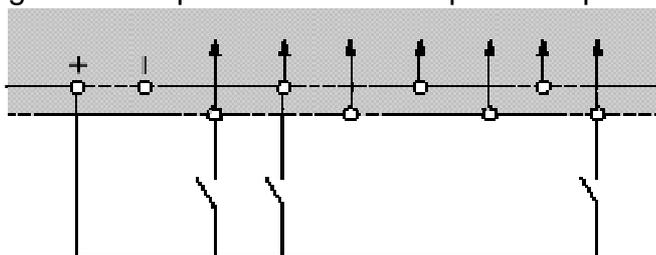
#### **1.3.6.3 Módulo de entradas**

A este módulo se unen eléctricamente los captadores (interruptores, finales de carrera, pulsadores, etc.). La información recibida en él, es enviada a la CPU para ser procesada de acuerdo la programación residente. Se pueden diferenciar dos tipos de captadores conectables al módulo de entradas:

- Captadores pasivos

Los captadores pasivos son aquellos que cambian su estado lógico, activado - no activado, por medio de una acción mecánica, como interruptores, pulsadores, etc.

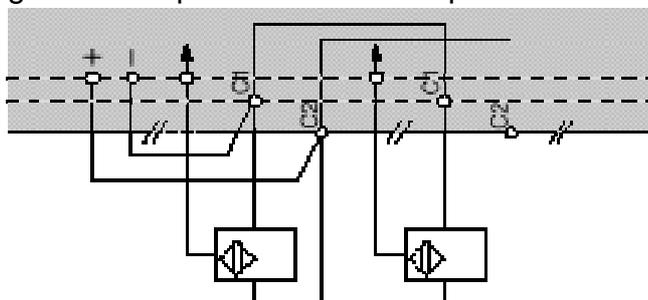
Figura 1.6 Representación de captadores pasivos

Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

- Captadores activos

Los captadores activos son dispositivos electrónicos que necesitan ser alimentados por una tensión para que varíen su estado lógico. Este es el caso de los diferentes tipos de detectores (inductivos, capacitivos, fotoeléctricos). Muchos de estos pueden ser alimentados por la propia fuente de alimentación del PLC.

Figura 1.7 Representación de captadores activos

Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

### 1.3.6.3.1 Tipos de entradas

- Entradas digitales

Los módulos de entrada digital permiten conectar captadores de tipo 1 ó 0 como finales de carrera, pulsadores, etc. Trabajan con señales de tensión, por ejemplo cuando por una vía llegan 24 voltios se interpreta como un "1" y cuando llegan 0 voltios se interpreta como un "0".

El proceso de adquisición de la señal digital consta de varias etapas:

- Protección contra sobretensiones
  - Filtrado
  - Puesta en forma de la onda
  - Aislamiento galvánico o por optoacoplador
- 
- Entradas analógicas

Los módulos de entradas analógicas permiten que los PLC programables trabajen con accionadores de mando analógico y lean señales de tipo analógico como pueden ser la temperatura, la presión o el caudal.

Los módulos de entradas analógicas convierten una magnitud analógica en un número que se deposita en una variable interna del autómatas. Lo que realiza es una conversión A/D, puesto que el autómatas suele trabajar con señales digitales. Esta conversión se realiza con una precisión o resolución determinada (numero de bits) y cada cierto intervalo de tiempo (periodo muestreo). Los módulos de entrada analógica pueden leer tensión o intensidad.

El proceso de adquisición de la señal analógica consta de varias etapas:

- Filtrado
- Conversión A/D
- Memoria interna

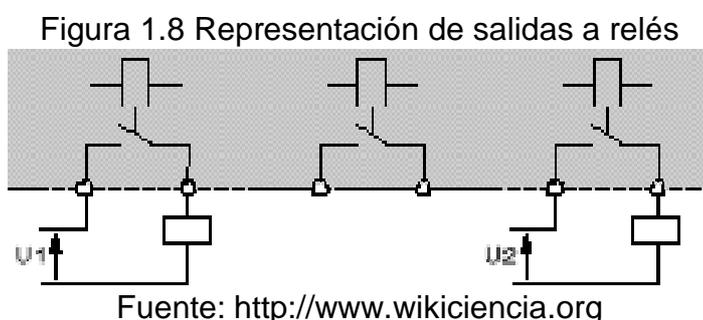
#### **1.3.6.4 Módulo de salidas**

El módulo de salidas del PLC es el encargado de activar y desactivar los actuadores (bobinas de contactores, lámparas, motores pequeños, etc.). La información enviada por las entradas a la CPU, una vez procesada, se envía al módulo de salidas para que éstas sean activadas y a la vez los actuadores que en ellas están conectados.

Según el tipo de proceso a controlar por el PLC, se puede utilizar diferentes módulos de salidas. Existen tres tipos bien diferenciados:

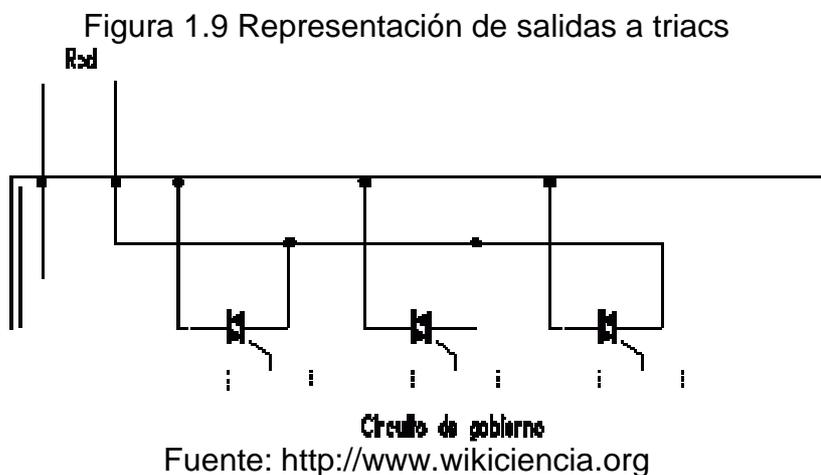
- Módulos de salidas a relés

Son usados en circuitos de corriente continua y alterna. Están basados en la conmutación mecánica, por la bobina del relé, de un contacto eléctrico normalmente abierto.



- Módulos de salidas a triacs

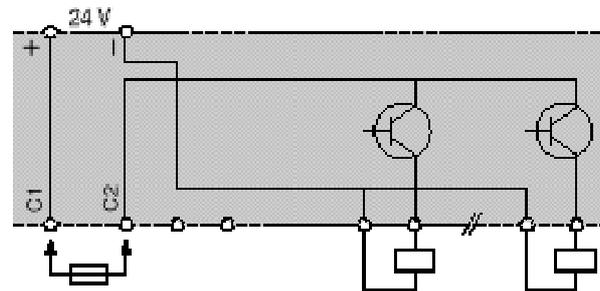
Se utilizan en circuitos de corriente continua y corriente alterna que necesiten maniobras de conmutación muy rápidas.



- Módulos de salidas a transistores a colector abierto

El uso de este tipo de módulos es exclusivo de los circuitos de DC. Igualmente que en los de triacs, es utilizado en circuitos que necesiten maniobras de conexión/desconexión muy rápidas.

Figura 1.10 Representación de salidas a transistores a colector abierto



Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

#### 1.3.6.4.1 Tipos de salidas

- Salidas digitales

Un módulo de salida digital permite al autómata programable actuar sobre los preaccionadores y accionadores que admitan órdenes de tipo todo o nada. El valor binario de las salidas digitales se convierte en la apertura o cierre de un relé interno del autómata en el caso de módulos de salidas a relé.

En los módulos estáticos (bornero), los elementos que conmutan son los componentes electrónicos como transistores o triacs, y en los módulos electromecánicos son contactos de relés internos al módulo.

Los módulos de salidas estáticos al suministrar tensión, sólo pueden actuar sobre elementos que trabajen todos a la misma tensión, en cambio los módulos de salida electromecánicos, al ser libres de tensión, pueden actuar sobre elementos que trabajen a tensiones distintas.

El proceso de envío de la señal digital consta de varias etapas:

- Puesta en forma
  - Aislamiento
  - Circuito de mando (relé interno)
  - Protección electrónica
  - Tratamiento cortocircuitos
- 
- Salidas analógicas

Los módulos de salida analógica permiten que el valor de una variable numérica interna del autómatas se convierta en tensión o intensidad.

Lo que realiza es una conversión D/A, puesto que el autómatas solo trabaja con señales digitales. Esta conversión se realiza con una precisión o resolución determinada (numero de bits) y cada cierto intervalo de tiempo (periodo muestreo).

Esta tensión o intensidad puede servir de referencia de mando para actuadores que admitan mando analógico como pueden ser los variadores de velocidad, las etapas de los tiristores de los hornos, reguladores de temperatura; permitiendo al PLC realizar funciones de regulación y control de procesos continuos.

El proceso de envío de la señal analógica consta de varias etapas:

- Aislamiento galvánico
- Conversión D/A
- Circuitos de amplificación y adaptación
- Protección electrónica de la salida

#### **1.3.6.5 Terminal de programación**

El terminal o consola de programación es el que permite comunicar al operario con el sistema. Las funciones básicas de éste son las siguientes:

- Transferencia y modificación de programas.
- Verificación de la programación.
- Información del funcionamiento de los procesos.

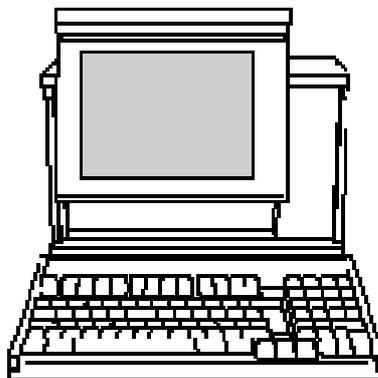
Como consolas de programación pueden ser utilizadas las construidas específicamente para el PLC, tipo calculadora o bien un ordenador personal, PC, que soporte un software especialmente diseñado para resolver los problemas de programación y control.

Figura 1.11 Terminal de programación portátil



Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

Figura 1.12 Terminal de programación compatible PC



Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

#### 1.3.6.6 Periféricos

Los periféricos no intervienen directamente en el funcionamiento del PLC, sin embargo facilitan la labor del operador.

Los más utilizados son:

- Grabadoras a cassettes.
- Impresoras.
- Cartuchos de memoria EEPROM.
- Visualizadores y paneles de operación OP.

Figura 1.13 Panel de operación

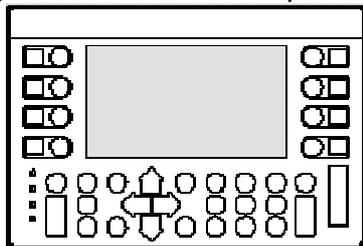
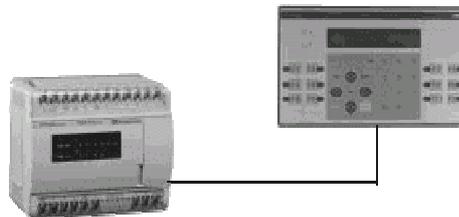
Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

Figura 1.14 Conexión de un visualizador a un PLC

Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

### 1.3.6.7 Interfaces

En el control de un proceso, es imprescindible un dialogo hombre - máquina junto con una comunicación entre la máquina y PLC, estas comunicaciones se establecerán por medio del conjunto de entradas y salidas del citado elemento. Los PLC son capaces de manejar tensiones y corrientes de nivel industrial, gracias a que disponen un bloque de circuitos de interfaz de E/S muy potente, que les permite conectarse directamente con los sensores y accionamientos del proceso.

Entre todos los tipos de interfaces que existen, las interfaces específicas permiten la conexión con elementos muy concretos del proceso de automatización. Se pueden distinguir entre ellas tres grupos bien diferenciados:

- Entradas / salidas especiales

Se caracterizan por no influir en las variables de estado del proceso de automatización. Únicamente se encargan de adecuar las E/S, para que puedan ser inteligibles por la CPU, si son entradas, o para que puedan ser interpretadas correctamente por actuadores (motores, cilindros, etc.), en el caso de las salidas.

- Entradas / salidas inteligentes

Admiten múltiples modos de configuración, por medio de unas combinaciones binarias situadas en la misma tarjeta. De esta forma se descarga el trabajo a la unidad central, con las ventajas que conlleva.

- Procesadores periféricos inteligentes

Son módulos que incluyen su propio procesador, memorias y puntos auxiliares de entrada/salida. Estos procesadores contienen en origen un programa especializado en la ejecución de una tarea concreta, a la que le basta conocer los puntos de consigna y los parámetros de aplicación para ejecutar, de forma autónoma e independiente de la CPU principal, el programa de control.

### 1.3.6.8 Memoria

La memoria es el almacén donde el PLC guarda todo cuanto necesita para ejecutar la tarea de control. Estos datos almacenados son los siguientes:

Tabla 1.1 Tipos de datos almacenados en la memoria del PLC

<b>Datos del proceso</b>	Señales de planta, entradas y salidas.
	Variables internas, de bit y de palabra.
	Datos alfanuméricos y constantes.
<b>Datos de control</b>	Instrucciones de usuario (programa)
	Configuración del PLC (modo de funcionamiento, número de e/s conectadas, etc.)

Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

Existen varios tipos de memorias:

- RAM (Random Access Memory): Memoria de lectura y escritura.

La memoria RAM se utiliza principalmente como memoria interna, y únicamente como memoria de programa en el caso de que pueda asegurarse el mantenimiento de los datos con una batería exterior.

- ROM (Read-Only Memory): Memoria de sólo lectura, no reprogramable.

La memoria ROM se utiliza para almacenar el programa monitor del sistema como se ha visto en el apartado dedicado a la CPU.

- EPROM: Memoria de sólo lectura, reprogramables con borrado por ultravioletas.

Las memorias EPROM se utilizan para almacenar el programa de usuario, una vez que ha sido convenientemente depurada.

- EEPROM: Memoria de sólo lectura, alterables por medios eléctricos.

Las memorias EEPROM se emplean principalmente para almacenar programas, aunque en la actualidad es cada vez más frecuente el uso de combinaciones RAM + EEPROM, utilizando estas últimas como memorias de seguridad que salvan el contenido de las RAM. Una vez reanudada la alimentación, el contenido de la EEPROM se vuelca sobre la RAM. Las soluciones de este tipo están sustituyendo a las clásicas RAM + batería puesto que presentan muchos menos problemas.

#### *1.3.6.8.1 Memoria interna*

Es aquella que almacena el estado de las variables que maneja el PLC: entradas, salidas, contadores, relés internos, señales de estado, etc. Esta memoria interna se encuentra dividida en varias áreas, cada una de ellas con un cometido y características distintas.

La clasificación de la memoria interna no se realiza atendiendo a sus características de lectura y escritura, sino por el tipo de variables que almacena y el número de bits que ocupa la variable. Así, la memoria interna se clasifica en las siguientes áreas:

Tabla 1.2 Clasificación de la memoria interna del PLC

<p><b>Área de imágenes de entradas / salidas y Área interna (IR)</b></p>	<p>En esta área de memoria se encuentran:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Los canales (registros) asociados a los terminales externos (entradas y salidas).</li> <li>○ Los relés (bit) internos (no correspondidos con el terminal externo), gestionados como relés de E/S.</li> <li>○ Los relés E/S no usados pueden usarse como IR.</li> </ul>
<p><b>Área especial (SR)</b></p>	<p>Son relés de señalización para las funciones particulares como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Servicio ( siempre ON, OFF)</li> <li>○ Diagnósis ( señalización o anomalías)</li> <li>○ Temporizaciones (relojes a varias frecuencias)</li> <li>○ Cálculo</li> <li>○ Comunicaciones</li> </ul>
<p><b>Área auxiliar (AR)</b></p>	<p>Contienen bits de control e información de recursos del PLC: Puerto RS232C, puertos periféricos, casetes de memoria, etc.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Se dividen en dos bloques: <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Señalización: Errores de configuración, datos del sistema.</li> <li>➤ Memorización y gestión de datos</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>Área de enlace (LR)</b></p>	<p>Se utilizan para el intercambio de datos entre dos PLCs unidos en forma PC Link (1:1).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Dedicados al intercambio de información entre PLCs.</li> <li>○ Si no se utilizan como LR pueden usarse como IR.</li> <li>○ Accesible en forma de bit o canal.</li> </ul>

<p><b>Área de retención (HR)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mantienen su estado ante fallos de alimentación o cambio de modo de PLC.</li> <li>○ Son gestionados como los IR y direccionables como bit o como canal.</li> </ul>
<p><b>Área de temporizadores y contadores (TIM/CNT)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Es el área de memoria que simula el funcionamiento de estos dispositivos.</li> <li>○ Son usados por el PLC para programar retardos y contajes.</li> </ul>
<p><b>Área de datos (DM)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Se trata de memoria de 16 bits (palabra).</li> <li>○ Utilizable para gestión de valores numéricos.</li> <li>○ Mantiene su estado ante cambios de modos de trabajo o fallo de alimentación.</li> <li>○ Direccionables como Canal (palabra).</li> <li>○ Esta área suele contener los parámetros de configuración del PLC (setup).</li> </ul>

Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

Las variables contenidas en la memoria interna, pueden ser consultadas y modificadas continuamente por el programa, cualquier número de veces. Esta actualización continua de los datos obliga a construir la memoria con dispositivos RAM.

#### *1.3.6.8.2 Memoria de programa*

La memoria de programa, normalmente externa y enchufable a la CPU mediante casete de memoria, almacena el programa escrito por el usuario para su aplicación. Cada instrucción del usuario ocupa un paso o dirección del programa.

Las memorias de programa o memorias de usuario son siempre de tipo permanente RAM + batería o EPROM/EEPROM. Por lo general la mayoría de los fabricantes de autómatas ofrecen la posibilidad de utilizar memorias RAM con batería para la fase de desarrollo y depuración de los programas, y de pasar estos a memorias no volátiles EPROM o EEPROM una vez finalizada esta fase.

La ejecución del programa en el módulo es siempre prioritaria, de forma que si se da tensión al autómata con un módulo conectado, la CPU ejecuta su programa y no el contenido en memoria RAM interna.

### **1.3.7 FUNCIONES DEL PLC**

#### **1.3.7.1 Funciones básicas**

- **Detección:** Lectura de la señal de los captadores distribuidos por el sistema de fabricación.
- **Mando:** Elaborar y enviar las acciones al sistema mediante los accionadores y preaccionadores.
- **Dialogo hombre maquina:** Mantener un diálogo con los operarios de producción, obedeciendo sus consignas e informando sobre el proceso.
- **Programación:** Para introducir, elaborar y cambiar el programa de aplicación del PLC. El dialogo de programación debe permitir modificar el programa incluso con el PLC controlando la máquina.

#### **1.3.7.2 Funciones complementarias**

- **Redes de comunicación**

Permiten establecer comunicación con otras partes de control. Las redes industriales permiten el intercambio de datos entre PLCs a tiempo real.

- Sistemas de supervisión

También los PLC permiten comunicarse con ordenadores provistos de programas de supervisión industrial. Esta comunicación se realiza por una red industrial o por medio de una simple conexión por el puerto serie del ordenador.

- Control de procesos continuos

Además de dedicarse al control de sistemas de eventos discretos los PLC llevan incorporadas funciones que permiten el control de procesos continuos. Disponen de módulos de entrada y salida analógicas y la posibilidad de ejecutar reguladores PID que están programados en el PLC.

- Entradas - salidas distribuidas

Los módulos de entrada / salida pueden estar distribuidos por la instalación, se comunican con la unidad central del PLC mediante un cable de red.

- Buses de campo

Mediante un solo cable de comunicación se pueden conectar al bus captadores y accionadores, reemplazando al cableado tradicional. El autómatas consulta cíclicamente el estado de los captadores y actualiza el estado de los accionadores.

### **1.3.8 PROGRAMACIÓN**

Los primeros PLC, en la primera mitad de los 80, eran programados usando sistemas de programación propietarios o terminales de programación especializados, que a menudo tenían teclas de funciones dedicadas que representaban los elementos lógicos de los programas del PLC. Los programas eran guardados en cintas. Más recientemente, los programas PLC son escritos en aplicaciones especiales en un ordenador, y luego son descargados directamente mediante un cable o una red. Los PLC viejos usan una memoria no volátil

(magnetic core memory), pero ahora los programas son guardados en una RAM con batería propia o en sistemas de memoria no volátil.

Los primeros PLC fueron diseñados para ser usados por electricistas que podían aprender a programar los PLC en el trabajo. Estos PLC eran programados con lógica de escalera (ladder logic). Los PLC modernos pueden ser programados de muchas formas, desde la lógica de escalera hasta lenguajes de programación tradicionales como el BASIC o C. Otro método es usar la Lógica de Estados (State Logic), un lenguaje de programación de alto nivel diseñado para programas PLC basándose en los diagramas de transición de estados.

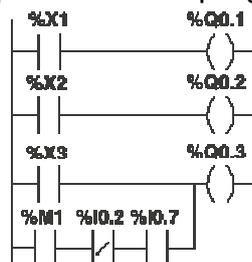
### 1.3.8.1 Lenguajes de programación

- Ladder o Escalera
- Listado de instrucciones (Mnemónico)
- Diagramas lógicos
- Lenguajes de alto nivel (GRAFCET, etc.)

#### 1.3.8.1.1 Programación ladder

Un esquema de escalera o contactos está constituido por líneas horizontales que contienen símbolos gráficos de prueba (Contactos) y de acción (Bobinas), que representan la secuencia lógica de operaciones que debe realizar el PLC.

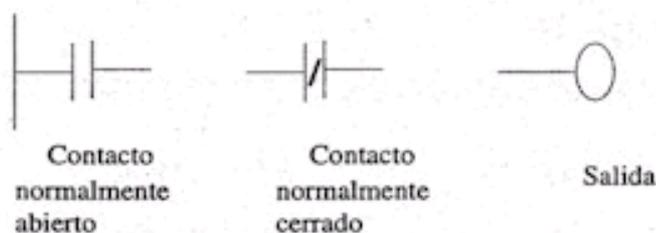
Figura 1.15 Esquema de una programación ladder



Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

La programación en Ladder de alguna forma se ha ido normalizando, al menos su simbología básica, según las normas NEMA y ya casi la mayoría de los fabricantes presentan y programan sus PLC en formatos muy parecidos. Los símbolos básicos son:

Figura 1.16 Simbología básica para la programación ladder



Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

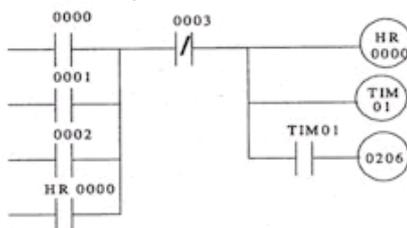
Los elementos básicos que configuran la función se representan entre dos líneas verticales que simbolizan las líneas de alimentación.

Para las líneas de función más complejas como temporizadores, registros de desplazamiento, etc., se emplea el formato de bloques. Estos no están formalizados, aunque guardan una gran similitud entre sí para distintos fabricantes y resultan mucho más expresivos que si se utiliza para el mismo fin el lenguaje en lista de instrucciones o mnemónico.

Las principales características de la programación Ladder son:

- Un programa en esquema de contactos, la constituyen una serie de ramas de contactos.
- Una rama está compuesta de una serie de contactos, conectados en serie o en paralelo que dan origen a una salida que bien puede ser una bobina o una función especial.

Figura 1.17 Esquema de contactos ladder



Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

- El flujo de la señal va de izquierda a derecha y de arriba abajo.
- A una rama de circuito en esquema de contactos le corresponde una secuencia de instrucciones en forma mnemónica.
- Una bobina no puede venir conectada directamente de la barra de inicio. En tal caso es necesario interponer un contacto siempre cerrado.

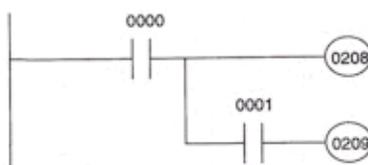
Figura 1.18 Conexión de una bobina



Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

- A la derecha de una bobina no es posible programar ningún contacto.
- El número de contactos posibles en serie o en paralelo es prácticamente ilimitado.
- Es posible colocar en paralelo 2 o más bobinas.

Figura 1.19 Conexión en paralelo de dos bobinas



Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

### 1.3.8.1.2 Mnemónico

Este lenguaje consiste en elaborar una lista de instrucciones o mnemónicos que se asocian a los símbolos y su combinación en un circuito eléctrico a contactos. Cada fabricante utiliza sus propios códigos, y una nomenclatura distinta para nombrar las variables del sistema. En los PLC de gama baja, es el único modo de programación. Este tipo de lenguaje es, en algunos los casos, la forma más rápida de programación e incluso la más potente.

Tabla 1.3 Ejemplo de lenguaje mnemónico

Dirección	Instrucción	Parámetro
0000	LD	H0501

Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

- Dirección: Indica la posición de la instrucción en la memoria de programa usuario.
- Instrucción: Especifica la operación a realizar.
- Parámetro: Son los datos asociados a la operación (instrucción). Los parámetros son en general de formato TIPO y VALOR.

Figura 1.20 Esquema de programación en mnemónico

```

000 LD %I0.1 Bp. inicio ciclo
    AND %I0.0 Dp. presencia vehículo
    AND %M3 Bit autorización reloj calendario
    AND %I0.5 Fc. alto rodillo
    AND %I0.4 Fc. detrás pórtico
005 S %M0 Memo inicio ciclo
    LD %M2
    AND %I0.5
    OR %I0.2 Bp. parada ciclo
    R %M0
010 LD %M0
    ST %Q0.0 Piloto ciclo

```

Fuente: <http://www.wikiciencia.org>

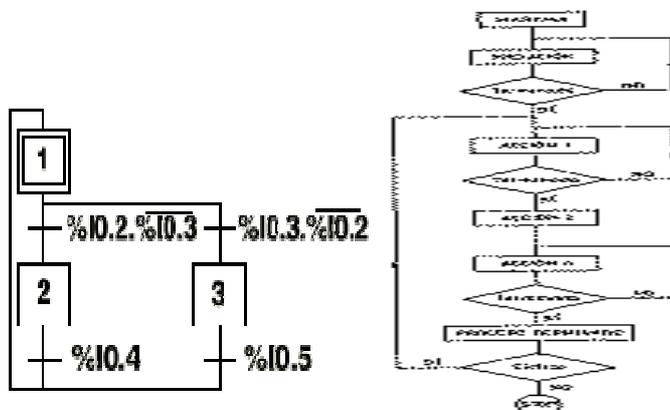
### 1.3.8.1.3 Gráfico de orden etapa transición (GRAFCET)

El GRAFCET surge en Francia a mediados de los años 70, debido a la colaboración de algunos fabricantes de PLC, como Telemecanique y Aper con dos organismos oficiales, AFCET (Asociación francesa para la cibernética, economía y técnica) y ADEPA (Agencia nacional para el desarrollo de la producción automatizada). Homologado en Francia, Alemania, y posteriormente por la comisión Electrónica Internacional (IEC 848, año 1988).

Es el llamado Gráfico de Orden Etapa Transición. Ha sido especialmente diseñado para resolver problemas de automatismos secuenciales. Las acciones son asociadas a las etapas y las condiciones a cumplir a las transiciones. Está definido por unos elementos gráficos y unas reglas de evolución que reflejan la dinámica del comportamiento del sistema. Este lenguaje resulta enormemente sencillo de interpretar por operarios sin conocimientos de automatismos eléctricos.

Todo automatismo secuencial o concurrente se puede estructurar en una serie de etapas que representan estados o subestados del sistema en los cuales se realiza una o más acciones, así como transiciones, que son las condiciones que deben darse para pasar de una etapa a otra.

Figura 1.21 Programación GRAFCET



Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>

### 1.3.9 APLICACIONES

El PLC, dada su alta potencialidad de control, tiene un campo de aplicación muy extenso. La permanente evolución del hardware y software amplía continuamente este campo con el fin de poder satisfacer las necesidades que se crean en el espectro de sus capacidades. Su aplicación se da fundamentalmente en instalaciones en donde es necesario un proceso de maniobra, control, señalización, etc.

Dada las extraordinarias características del PLC como sus reducidas dimensiones, la extremada facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenar los programas para su posterior y rápida utilización, la modificación o alteración de los mismos, entre otras, hace que se lo emplee en aplicaciones tales como:

- Manejo de máquinas móviles: prensas, robots, soldadoras, máquinas herramientas, ensambladoras, etc.
- Control de equipos de generación de energía: motores, calderos, intercambiadores de calor, bombas, turbinas, etc.
- Instalaciones de control y seguridad industrial: alarmas, chequeos, sensores, accesos, etc.
- Control de procesos industriales complejos: elaboración de alimentos, embotelladoras, embalaje de cajas, clasificadoras, etc.
- Instalación de aire acondicionado, calefacción y otras facilidades.
- Señalización del estado de procesos.

## **CAPÍTULO 2**

### **INTRODUCCIÓN A LOS CALDEROS DE VAPOR**

#### **2.1 GENERALIDADES**

Los calderos han estado presentes desde hace más de doscientos años, como un elemento esencial en diferentes aplicaciones de la actividad humana. Se los puede observar en muchos sectores de tipo industrial, comercial y doméstico en todo el mundo, transfiriendo calor de fuentes externas hacia el agua u otros fluidos de trabajo. Se los ha diseñado con fines energéticos dada su gran capacidad térmica. Los calderos suelen ser simples, eficientes y fiables, por esto su gran popularidad.

Han sido utilizados con diversos propósitos, aunque en su origen, a mediados del siglo XIX, se los empezó a utilizar para procesos de calefacción. Inclusive, desde esa época se empezaron a emplear en procesos industriales. Actualmente se los utiliza en fábricas, planchadoras de ropa, lavaplatos, pasteurización de leche, esterilización de equipos médicos, generación de energía eléctrica, procesos de bombeo de sustancias viscosas, etc. Sus capacidades son muy versátiles y variadas.

Sin embargo, un caldero de vapor puede representar un riesgo potencial si es que no se toman todas las medidas de precaución del caso. Debe tomarse en cuenta que la energía que puede acumular un caldero es significativamente grande. Es por esto que su manejo debe ser realizado adecuadamente de forma que resulte seguro y provechoso.

## 2.2 DEFINICIÓN DE CALDERO

Un caldero es una máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para la generación de vapor saturado. Éste vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. Los calderos son un caso particular de intercambiadores de calor, en las cuales se produce un cambio de fase. Además son recipientes a presión, por lo cual son construidos con materiales que soporten los grandes esfuerzos internos, a semejanza de muchos contenedores de gas y otros envases a presión.

Así, en términos generales, la palabra caldero se aplica a todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor. Por razones de economía, el calor debe ser generado y suministrado con un mínimo de pérdidas.

Figura 2.1 Calderos



Fuente: DANFOSS; District heating and boiler applications

## 2.3 CONCEPTOS TERMODINÁMICOS

### 2.3.1 VAPOR Y EVAPORACIÓN

Evaporación es el cambio de estado líquido a vapor por acción del calor. Las moléculas de líquido que escapan desde la superficie del líquido y pasan a la fase vapor son aquellas que han adquirido suficiente energía para vencer la cohesión molecular que las mantiene en el seno del líquido. Las moléculas que han pasado a la fase vapor, ejercen presión, la cual va aumentando a medida que las moléculas se evaporan hasta llegar a un equilibrio a una determinada temperatura. A esta presión al equilibrio se la conoce como presión de vapor.

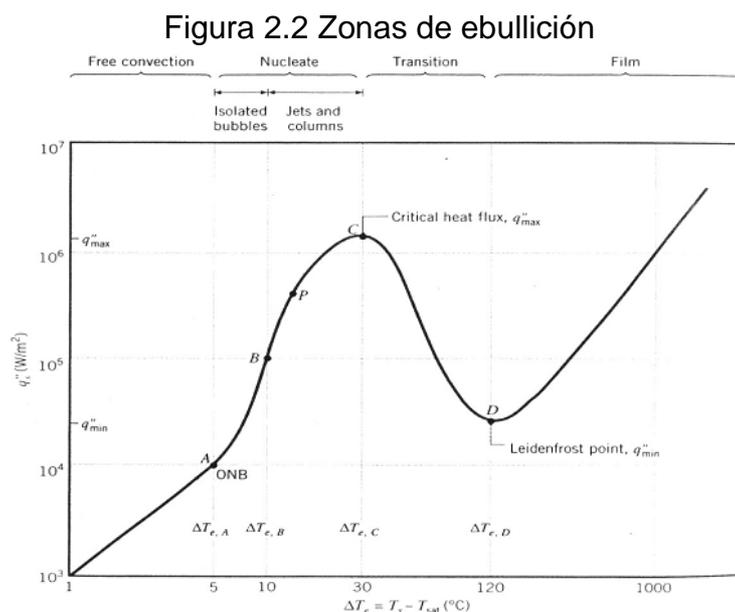
Si el agua se calienta en un recipiente abierto, su temperatura sube hasta cuando la presión de vapor es igual a la presión atmosférica. A la temperatura en este punto ó punto de ebullición, la evaporación del agua deja de ser un fenómeno únicamente superficial y se tiene producción de vapor desde toda la masa del líquido. La temperatura permanece constante. Si se calienta en un recipiente cerrado, la temperatura y la presión se elevan pudiendo llegarse al límite impuesto por la resistencia de las paredes del recipiente.

La transferencia de calor entre una superficie caliente y el líquido, es función de la diferencia de temperaturas entre la superficie y el líquido. Cuando la diferencia de temperaturas es muy pequeña la transferencia de calor es por convección, fenómeno por el cual las porciones de líquido calentadas por el contacto con la superficie caliente suben a la superficie donde ocurre la evaporación.

Si la diferencia de temperaturas es mayor, el flujo de calor aumenta hasta un punto máximo y se tiene formación de burbujas que ascienden a la superficie desde toda la masa del líquido, régimen de ebullición conocido como ebullición nucleada.

Desde este punto máximo, el flujo de calor decrece hasta un mínimo, debido a que la superficie caliente se recubre de una capa de vapor que presenta

resistencia a la transferencia de calor, se tiene un régimen de ebullición conocido como ebullición en película. Desde el punto mínimo hay luego un incremento en flujo debido a radiación.



### 2.3.2 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL VAPOR

En el estudio termodinámico de la transformación de fase entre agua líquida y vapor saturado se deben cuantificar ciertas variables que definen la energía que emplea el sistema. Las propiedades más importantes que caracterizan al proceso son: presión, temperatura, calor sensible, calor latente, calor de sobrecalentamiento, entalpía, entropía, volumen específico y densidad.

- Presión: es la fuerza por unidad de superficie que ejerce, en este caso, el vapor de agua sobre el recipiente que lo contiene. Esta magnitud es proporcional a la velocidad promedio de las moléculas y al número de

moléculas por unidad de volumen. Esto se traduce en una dependencia respecto a la temperatura y la densidad de vapor.

- Temperatura: es una medida de la energía interna de las moléculas de las sustancias. Se la mide debido al cambio de propiedades que dependen de ella, como por ejemplo, mediante la dilatación de una columna de mercurio, entre otras formas.
- Calor Sensible: es la cantidad de calor que produce una elevación de la temperatura de un cuerpo sin que se produzca un cambio de fase.
- Calor Latente: es la cantidad de calor que produce un cambio de fase del cuerpo sin que cambie la temperatura y a presión constante.
- Calor Latente de Vaporización: es la cantidad de calor necesaria para pasar una unidad de masa de agua líquida a vapor saturado seco, a la temperatura de saturación.
- Calor de Sobrecalentamiento: es la cantidad de calor necesaria para elevar, a presión constante, la temperatura del vapor sobre la temperatura de saturación.
- Entalpía: es la cantidad de energía total que posee un cuerpo, la cual tiene dos componentes principales: la energía interna (asociada con la materia) y el trabajo mecánico efectuado sobre dicho cuerpo.
- Entropía: es una propiedad que puede interpretarse como una medida del desorden o aleatoriedad molecular. Un alto nivel de entropía es muestra de la generación de irreversibilidades en los procesos termodinámicos.
- Volumen Específico: es el volumen por unidad de masa de una sustancia. La variación de esta propiedad en el vapor de agua respecto a la fase líquida es bastante considerable.
- Densidad: es la relación entre masa por unidad de volumen. También resulta en el inverso del volumen específico para un cierto estado determinado.

## 2.4 TIPOS PRINCIPALES DE CALDEROS

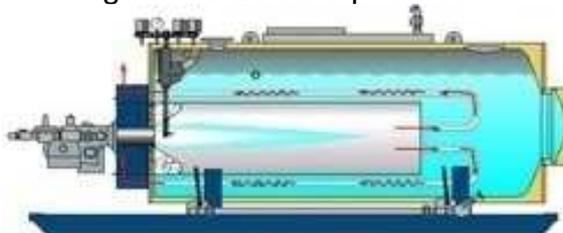
Los calderos, dada su forma de generación de energía calórica, se clasifican de la siguiente manera:

- Calderos de Tubos de Humo o Piro tubulares
- Calderos Acuotubulares
  - Calderos horizontales de tubos rectos
  - Calderos de tubos curvados
    - De circulación natural
    - De circulación forzada
- Calderos de cuerpo de acero
  - Calderos eléctricos
  - Calderos de fogón interno
  - Calderos sin fuego

### 2.4.1 CALDEROS PIROTUBULARES

Son aquellos en que el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente, y es atravesado por tubos por los cuales circula fuego y gases producto de un proceso de combustión.

Figura 2.3 Caldero piro tubular



Fuente: <http://www.juandutari.htmlplanet.com>

#### 2.4.1.1 Ventajas

- Menor costo inicial debido a su simplicidad de diseño.
- Mayor flexibilidad de operación.
- Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación.

#### 2.4.1.2 Desventajas

- Mayor tamaño y peso.
- Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.
- No son empleables para altas presiones.

### 2.4.2 CALDEROS ACUOTUBULARES

Son aquellos en que los gases y humos provenientes de la combustión rodean tubos por cuyo interior el fluido de trabajo se desplaza durante su calentamiento. Son los más utilizados en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida, y gran capacidad de generación.

Figura 2.4 Caldero acuotubular



Fuente: <http://www.juandutari.htmlplanet.com>

#### 2.4.2.1 Ventajas

- Pueden ser puestas en marcha rápidamente.
- Son pequeñas y eficientes.

- Trabajan a 30 ó más atmósferas de presión.

#### 2.4.1.2 Desventajas

- Mayor costo.
- Deben ser alimentadas con agua de gran pureza.

#### 2.4.3 CALDEROS ELÉCTRICOS

Los calderos eléctricos son usados para generar vapor en varios procesos de diferentes industrias, por ejemplo: lavanderías, fábricas procesadoras de alimentos y hospitales. Sin embargo son más caros que los calderos que funcionan con gas o combustible, pero son más populares por su simplicidad y facilidad de uso. Estos calderos convierten la energía eléctrica en energía térmica con casi 100% de eficiencia pero esta eficiencia térmica es variable, depende de la eficiencia con la cual la electricidad es generada.

Figura 2.5 Calderos eléctricos



Fuente: FULTON BOILER WORKS INC.; Fulton Electric Steam Boilers: From 12 to 1000 kW (1.2 to 100 BHP)

Este tipo de caldero presenta ciertas ventajas respecto a los tradicionales calderos de combustibles, por las siguientes razones:

- Eliminación de manejo, distribución y almacenamiento de combustible.
- Eliminación de ventiladores, cajas de humo y chimeneas.
- Eliminación de manejo de cenizas.
- Reducción del área de trabajo ocupada.
- Eliminación de líneas de tubería largas.

El bajo costo inicial de adquisición del caldero eléctrico, junto con su flexibilidad y poco espacio de instalación, así como la ausencia de manejo de combustibles e instalaciones para su almacenamiento y otros detalles más, justifican el mayor costo de la energía eléctrica. El caldero eléctrico produce vapor rápidamente y puede igualmente desconectarse inmediatamente. Para fines estimativos, se considera que son necesarios 35 kw para producir la misma cantidad de vapor que un galón de fuel oil No. 5.<sup>6</sup>

En principio, el electrodo del generador de vapor está rodeado de un cilindro de agua que actúa como el medio conductor para el paso de la corriente eléctrica. La resistencia del agua, con su contenido de precipitados, determina el grado de liberación de calor; el agua debe ser tratada, primero, para eliminar los precipitados que contiene, para después agregarle sustancias conductivas.

Para los casos en que se requiera una cantidad nominal reducida de vapor, se puede obtener un caldero de vapor eléctrico chico. Estas unidades operan con tensiones que fluctúan entre 220 y 550 voltios y tienen capacidades que varían entre 26,3 kg/h hasta 626 kg/h de vapor, consumiendo de 20 a 400 amperios. Se construyen para presiones hasta de 35,15 kg/cm<sup>2</sup> (500 lb/in<sup>2</sup>), pero su temperatura de operación no debe exceder de 243 °C (470°F)<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> SHIELD, C.; Calderas: Tipos, Características y sus Funciones; Continental; México; 1985; p. 214

<sup>7</sup> Ibid; p. 286

## 2.5 COMPONENTES DE LOS CALDEROS ELÉCTRICOS

### 2.5.1 ELEMENTO CALEFACTOR

Los calderos eléctricos requieren un elemento que proporcione la energía necesaria para lograr la generación de vapor a partir del aumento de la entalpía del agua almacenada en su interior. Este componente se trata de una resistencia eléctrica que transforma la energía eléctrica en energía calórica debido al efecto Joule. Este principio enuncia que la energía calórica generada es proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente y a la resistencia eléctrica, es decir:

$$Q = I^2 \cdot R \quad (2.1)$$

Donde:

Q: Energía calórica generada

I: Intensidad de corriente eléctrica

R: Resistencia (resistividad) eléctrica

También debe recordarse que otro principio fundamental que determina el comportamiento de una resistencia eléctrica es la ley de Ohm, que manifiesta que el voltaje es igual al producto de la resistencia eléctrica por la intensidad de corriente, es decir:

$$V = I \cdot R \quad (2.2)$$

Donde:

V: Energía calórica generada

I: Intensidad de corriente eléctrica

R: Resistencia (resistividad) eléctrica

De esta manera, se entiende que este tipo de resistencias eléctricas deben estar elaboradas de materiales conductores, siendo el cobre y aleaciones de este tipo los más populares. Sin embargo, en aplicaciones donde se requiere mayor potencia generada es conveniente que este elemento tenga un recubrimiento especial que podría ser de acero inoxidable. Además, este componente deberá resistir las temperaturas generadas, los posibles choques térmicos y otras condiciones de operación.

En el mercado existen resistencias de diversas formas, tamaños y potencias eléctricas. Las más conocidas son las 1,5 kw; 3 kw; 4,5 kw y 5,5 kw, tanto para 110, 220 y 440 V; de igual manera se pueden elaborar resistencias de mayores potencias según el material utilizado, el tamaño y el voltaje de conexión. Se recomienda que estos elementos calefactores no deben generar más allá de 75 vatios por cada pulgada cuadrada (sq. in.) de área exterior, caso contrario se comprometen los materiales de la resistencia.

### **2.5.2 CONTROL DE PRESIÓN**

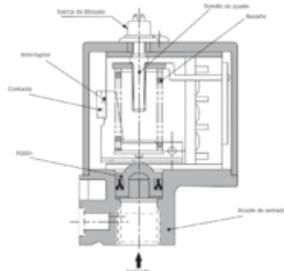
Generalmente en los calderos de vapor, la presión del vapor de salida es la variable controlada. Esta actúa directamente sobre la operación del mecanismo que proporciona la energía, accionando dispositivos de parada o arranque dependiendo si las presiones de operación han sido o no satisfechas.

El controlador de presión del vapor (presostato) puede ser de uno de los dos tipos generales: de posición proporcional o proporcional más flotación (reset). Para calderos que operan a presiones bajas y tienen una capacidad de almacenamiento considerable de agua y vapor, un tipo de posición proporcional puede utilizarse. En este controlador, el movimiento es directamente proporcional al cambio de presión (entre los límites alto y bajo). Un controlador proporcional más flotación se utiliza en calderos de presión alta y una capacidad pequeña.

Los presostatos básicamente están compuestos por un diafragma, un mecanismo de transmisión de movimiento y contactos eléctricos que pueden ser platinos o

bulbos de mercurio. El diafragma es un elemento que censa la presión y produce una deformación que será multiplicada y transmitida por un resorte o un mecanismo de barras al elemento que produce el contacto eléctrico.

Figura 2.6 Diagrama de un presostato



Fuente: <http://es.wikipedia.org>

Figura 2.7 Presostatos



Fuente: DANFOSS A/S; Data Sheet: Pressure switches and thermostats, types KP and KPI

Los presostatos tienen puntos definidos para conectar (cut in) y desconectar (cut out). Es decir, están ajustados para iniciar su acción cuando la presión se reduce a un valor mínimo preestablecido en el control y termina su acción cuando la presión aumenta hasta un valor máximo determinado. A la diferencia de valores entre desconectar y conectar se define como diferencial. En general, el tamaño del diferencial depende de cada caso en particular.

Además del diferencial, los controles tienen otra característica denominada rango, el cual también está asociado con los valores de conectar y desconectar. Aunque, al igual que para el diferencial el rango puede definirse como la diferencia entre conectar y desconectar, los dos son diferentes. Por ejemplo, supóngase que el presostato está ajustado para conectar a una presión de 60 psi y desconectar a 80 psi; mientras que el diferencial se dice de 20 psi (80-60), el rango está entre 80 y 60 psi.

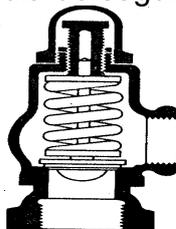
De acuerdo con las normas, además de los controles eléctricos (presostatos), los calderos deben contar con un manómetro y una o más válvulas de seguridad, calculadas en base a la capacidad de generación de vapor del caldero y

dimensionadas para permitir un rápido alivio de presiones en caso de que ésta sobrepase los niveles permisibles.

### 2.5.3 VÁLVULA DE SEGURIDAD

La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), establece que una válvula de seguridad es un elemento automático de alivio de presiones activado por la presión estática del fluido y caracterizado por una acción de abertura total de la válvula.

Figura 2.8 Válvula de seguridad de resorte



Fuente: <http://www.monografias.com>

La operación de una válvula de seguridad, está basada en las leyes naturales de los gases y la mecánica de los fluidos, estas son:

- Los líquidos son relativamente incompresibles.
- Gases y vapores son compresibles por consiguiente expandibles.
- La mayoría de líquidos y gases se expanden en presencia de calor.
- Un cambio de fase (sólido, líquido o gas) puede ocurrir dependiendo de las condiciones de temperatura y presión.

### **2.5.3.1 Operación de la válvula de seguridad**

La operación de la válvula de seguridad se realiza por la propiedad de compresión del vapor. Este medio ejerce una fuerza contra el disco de la válvula, la cual resiste por la acción de un resorte. La presión requerida para vencer la fuerza del resorte se conoce como Punto de Operación (Set Point). El valor del punto de operación está establecido por el código ASME sección I.

Cuando la presión del medio alcanza el punto de operación, se levanta el disco y expone un área mayor a la presión. Este incremento de área fuerza a la válvula a abrirse rápidamente, dando lugar al término disparo de la válvula (Pop Valve).

El disco y su ensamble de asiento también incluyen unos anillos de ajuste para el soplado (blow down), los mismos que regulan la cantidad de soplado antes que la válvula vuelva a cerrarse. El soplado es la diferencia entre la presión cuando la válvula de seguridad se abre y la presión a la cual se cierra. La cantidad de soplado también está indicada por los códigos, pero generalmente no es menor que el 96% de la presión del punto de operación de la válvula de seguridad.

La capacidad de la válvula de seguridad está dada en flujo de masa por hora. Debe dimensionarse de acuerdo con la presión de trabajo y no debe ser mayor que el 6% de la presión máxima de trabajo.

### **2.5.4 CONTROL DE NIVEL DE AGUA**

En los calderos, el nivel del líquido debe mantenerse en un punto específico para garantizar una operación segura y evitar situaciones peligrosas. Por tanto, es necesaria la instalación de un control que permita ejecutar múltiples acciones bajo la dependencia de una sola variable, el nivel de agua.

Dentro de los diferentes tipos de control de nivel de agua, se tienen los siguientes:

- Desplazamiento (flotador)
- Presión diferencial

- Por burbujeo
- Capacitivo
- Por ultrasonido
- Conductivímetro
- Radioactivo
- Por electrodos

#### **2.5.4.1 Flotador**

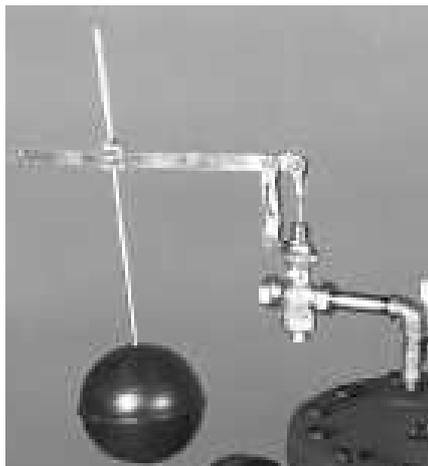
Los controles de nivel de agua de este tipo tienen en su interior una boya, la cual se desplazará en respuesta al aumento o disminución del nivel de agua. Básicamente son de dos tipos: de accionamiento mecánico y de accionamiento magnético.

##### *2.5.4.1.1 Accionamiento mecánico*

Este control de nivel de agua permite el cambio de la posición de dos interruptores de mercurio, los cuales accionan o apagan la alimentación de agua y encienden o interrumpen la operación del elemento calefactor. Adicionalmente pueden actuar sobre una alarma que indique al operador un bajo nivel de agua.

Cuando el caldero se encuentra vacío, el bulbo de mercurio más exterior (de dos contactos) actuará como paso de corriente para el accionamiento para un contactor que pone en funcionamiento la alimentación de agua. Éste al igual que el otro bulbo son pivoteados aproximadamente al centro, cuando la boya mediante una barra de accionamiento presiona el diafragma sobre el cual se encuentran montados los bulbos, éstos cambiarán su posición; el mercurio líquido se desplaza gradualmente dentro del bulbo hasta desconectar el contacto que acciona el actuador, produciéndose el corte de alimentación de agua.

Figura 2.9 Flotador de accionamiento mecánico



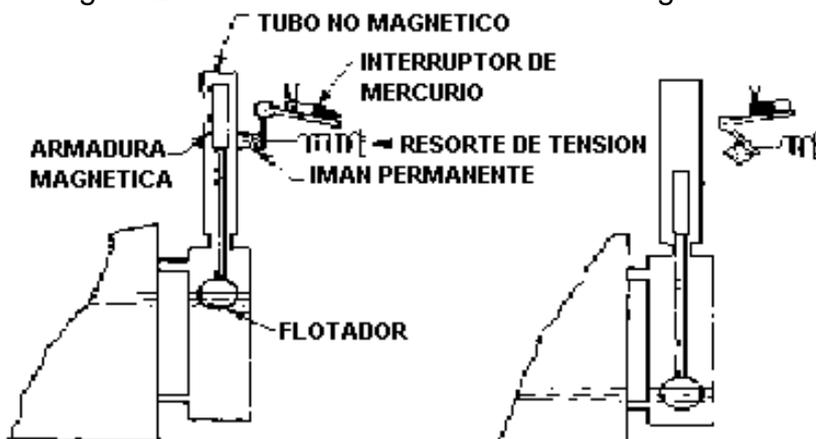
Fuente: <http://www.rossvalve.com>

#### *2.5.4.1.2 Accionamiento magnético*

El principio de operación de este control involucra tres factores: un imán permanente, su fuerza del campo magnético, y un pistón de acero inoxidable (montado sobre el mecanismo de flotador de boya), el cual se mueve libremente dentro de un tubo no magnético.

En la posición de nivel normal el pistón magnético es accionado por el flotador hasta ubicarlo dentro del campo magnético del imán permanente. Esta posición permite al bulbo de mercurio permanecer en su posición de no accionar la alimentación de agua. A medida que el nivel de líquido disminuye, el pistón magnético bajará lentamente por la acción del flotador. A una determinada posición de bajo nivel de líquido, el pistón quedará libre de la acción del campo magnético. Esto libera al imán permanente y mediante la acción del resorte permite al bulbo de mercurio accionar el contactor del actuador.

Figura 2.10 Flotador de accionamiento magnético



Fuente: LABAT, S.; RODRIGO, S.; Medidores de Nivel

#### 2.5.4.2 Presión diferencial

Para el caso de un caldero, en el cual el recipiente es un tanque cerrado se mide la presión de la siguiente manera:

$$P = P_{\text{líquido}} - P_{\text{depósito}} \quad (2.3)$$

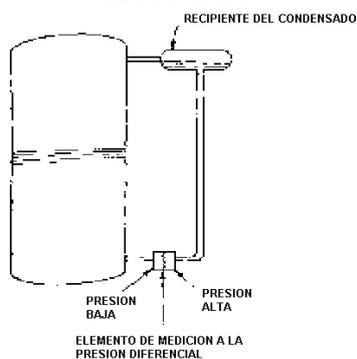
Donde:

P: Presión diferencial

$P_{\text{líquido}}$ : Presión del líquido

$P_{\text{depósito}}$ : Presión del recipiente

Figura 2.11 Medición por presión diferencial



Fuente: LABAT, S.; RODRIGO, S.; Medidores de Nivel

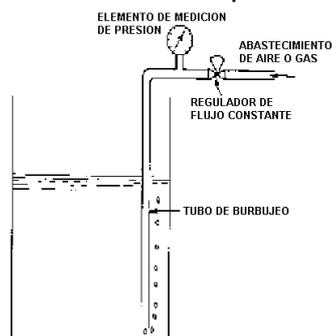
Figura 2.12 Medidores de presión diferencial

Fuente: <http://www.koboldmessring.com>

### 2.5.4.3 Por burbujeo

Consiste en generar una corriente continua de burbujas desde el nivel mínimo. La presión requerida es proporcional a la columna de líquido en dicho momento. Se aplica principalmente para líquidos corrosivos.

Figura 2.13 Medición por burbujeo



Fuente: LABAT, S.; RODRIGO, S.; Medidores de Nivel

### 2.5.4.4 Capacitivo

Se basa en medir la variación de capacitancia de un condensador cuando va variando el medio dieléctrico entre sus placas. Con el depósito metálico e introduciendo una sonda metálica sin contacto entre ambos, se forma un condensador. Al variar el nivel del líquido varía proporcionalmente la capacitancia. Si el depósito no es metálico se introducen dos sondas.

Figura 2.14 Medidor capacitivo

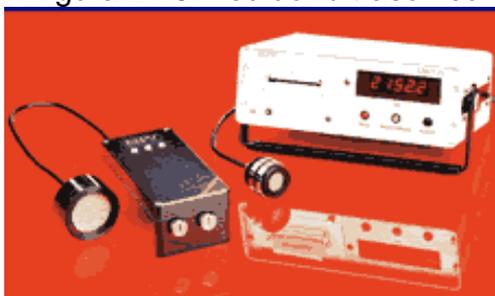


Fuente: LABAT, S.; RODRIGO, S.; Medidores de Nivel

#### 2.5.4.5 Por ultrasonido

Consiste en un medidor de ondas sonoras de alta frecuencia (20-40 KHz) que se propaga por la fase gaseosa hasta que choca con el líquido, se refleja y alcanza el receptor situado en el mismo punto que el emisor. El tiempo entre emisión y recepción es inversamente proporcional al nivel, también depende de la temperatura. Se debe evitar obstáculos en el recorrido de las ondas. El medidor es sensible al estado de la superficie del líquido.

Figura 2.15 Medidor ultrasónico



Fuente: <http://www.directindustry.es>

#### 2.5.4.6 Conductivímetro

Consiste en una sonda con dos electrodos. Funciona en el instante en que el líquido cierra un circuito eléctrico y se conmuta un contacto. Se lo aplica como interruptor de nivel en líquidos conductores.

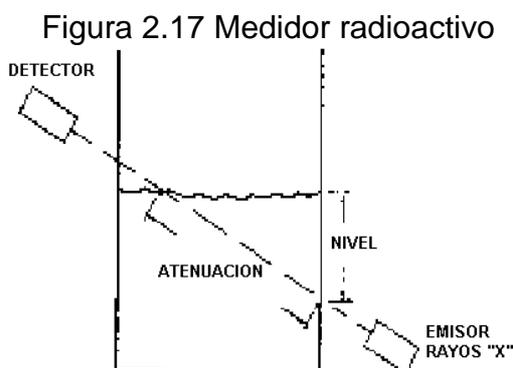
Figura 2.16 Conductivímetro



Fuente: LABAT, S.; RODRIGO, S.; Medidores de Nivel

### 2.5.4.7 Radioactivo

Consiste en colocar una fuente radioactiva a un lado, y un medidor de radiación al otro. Su principal desventaja es que necesita recalibración y se presentan dificultades técnicas y económicas en su aplicación. Puede resultar efectivo para fluidos de altas temperaturas.



Fuente: LABAT, S.; RODRIGO, S.; Medidores de Nivel

### 2.5.4.8 Por electrodos

Este método utiliza la conductividad eléctrica del líquido para el control de nivel en la caldera. La resistividad del agua utilizada en la generación de vapor oscila entre los 7000 y 20000 ohmios. Tres electrodos ubicados en la columna de agua para verificación del nivel y uno ubicado en el interior del tanque, sirven para accionar el control de encendido del elemento calefactor y la bomba de alimentación de agua.

Partiendo de un caldero vacío o con el nivel de agua por debajo de los extremos inferiores de los electrodos de control, la bomba de alimentación de agua se encenderá automáticamente ya que no existe el cortocircuito requerido entre los electrodos de apagado de la bomba. El nivel de agua subirá hasta alcanzar el electrodo de nivel óptimo, entonces el cortocircuito se establecerá y será detenida la bomba de agua. Por otro lado al no existir en un inicio el nivel de agua mínimo requerido, no se establece la conducción entre los extremos de los electrodos

más largos y la operación del elemento calefactor no es permitida; cuando el nivel de agua establece el contacto, el elemento calefactor puede iniciar su operación.

El control del nivel de agua por electrodos sumergidos requiere para su operación de la existencia de minerales en disolución, para obtener características conductivas. Cuando los requerimientos de calidad de agua son estrictos, la aplicación de este tipo de control no es recomendable.

Figura 2.18 Electrodo de nivel



Fuente: FULTON HEATING SOLUTIONS INC.; Fulton Electric Boilers (Steam Models): Instalation, Operation and Maintenance Manual

### **2.5.5 SUMINISTRO DE AGUA**

El suministro de agua al caldero se realiza con una bomba de agua de alimentación. El caldero se alimenta, ya sea en forma continua o intermitente, de tal manera que el nivel se conserve relativamente constante. Su flujo será regulado automáticamente de manera que la cantidad que ingresa al caldero sea igual a la cantidad de vapor producido más el flujo de agua de purga, todo esto por unidad de tiempo. Para esto, el sistema de alimentación de agua debe estar provisto de un control de flujo para mantener un nivel de agua en el interior del caldero.

La presión de diseño de la bomba de agua de alimentación será ligeramente superior a la máxima presión de vapor que podría alcanzar el caldero en

condiciones extremas. En otras palabras, será superior a la presión de accionamiento de la válvula de seguridad y del disparo automático del caldero por alta presión de vapor.<sup>8</sup>

Una de las condiciones imprescindibles en la operación de calderos, es mantener en forma constante el nivel de agua durante los periodos de arranque, producción de vapor y parada hasta cuando el caldero se enfríe.

Figura 2.19 Bomba hidráulica



Fuente: <http://www.codeso.com>

### 2.5.5.1 Tratamiento de agua

Un caldero puede ser aprovechado eficientemente solamente si se da una apropiada atención al tratamiento del agua. Un caldero no cumplirá con su función si en las superficies de transferencia de calor existen depósitos o incrustaciones y se permite la presencia de elementos corrosivos. El tratamiento de agua puede incluir el acondicionamiento de:

- Agua cruda.
- Condensados del vapor de procesos o turbinas.
- Agua del caldero.

Un apropiado acondicionamiento se obtendrá cuando:

---

<sup>8</sup> INSTITUTO NACIONAL DE ENERGÍA (INE); Sistemas de Calderos; p. 274

- Se evite la formación de depósitos en las superficies internas.
- Se controle la corrosión en las superficies internas.
- No exista la formación de espuma y el arrastre con el vapor de los sólidos presentes en el agua del caldero.

El agua de alimentación en el caldero se evapora y los sólidos se concentran en el interior del mismo. Si la concentración de estos sólidos excede ciertos límites, la calidad del vapor se verá afectada por arrastre de los mismos. Además, los sólidos presentes en el agua del caldero pueden adherirse a las superficies internas como depósitos o lodos.

#### *2.5.5.1.1 Impurezas presentes en el agua*

El agua nunca está presente en forma pura. Todas las aguas naturales contienen cantidades variables de materia disuelta y suspendida. El tipo y la cantidad de impurezas en el agua varía de acuerdo a su origen: río, pozo, lluvia, agua potable, etc.

- El agua de lluvia contiene en solución gases atmosféricos como O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.
- En aguas de pozos se encuentran grandes cantidades de minerales disueltos.
- En aguas superficiales se encuentra frecuentemente materia orgánica, la cual debe ser removida previamente para ser alimentada al caldero.

Los sólidos suspendidos son aquellos que no se disuelven en el agua y pueden ser removidos o separados por decantación, filtración o clarificación. Algunos de estos son arena, arcilla, materia coloidal y algunos óxidos metálicos. Los sólidos disueltos son aquellos que están en solución y no pueden ser removidos por los procesos citados anteriormente. Los más frecuentes en el agua son: sílice, hierro, calcio, magnesio y sodio.

Las incrustaciones ocurren cuando los compuestos de calcio y magnesio en el agua (aguas duras) precipitan y se adhieren a las superficies internas. Estos compuestos son menos solubles cuando se incrementa la temperatura. Las incrustaciones producen un decrecimiento en el intercambio de calor, seguido por fallas y daños del equipo.

Los depósitos porosos ayudan a concentrar más los sólidos del agua del caldero. Un tratamiento externo del agua se requiere cuando la concentración de una o más impurezas del agua de alimentación es alta para ser tratada para el caldero. La selección del equipo y el tratamiento del agua cruda, solamente debe realizarse luego de un análisis de la composición del agua cruda, cantidad requerida de agua de reposición, tipo de caldero y presión de operación.

#### *2.5.5.1.2 Tratamiento del agua cruda*

El primer paso en el acondicionamiento del agua es la coagulación y filtración del material suspendido. Una decantación natural removerá parcialmente los sólidos suspendidos y el tiempo de decantación requerido dependerá de la gravedad específica, número y tamaño de las partículas. Este proceso puede ser acelerado por coagulación.

La coagulación es el proceso por el cual los materiales finamente divididos, con el uso de ciertos compuestos químicos, producen grandes partículas capaces de decantar rápidamente. Existen coagulantes orgánicos e inorgánicos. Previamente al tratamiento por coagulación, se trata el agua con cloro para oxidar la materia orgánica.

Luego de la clarificación del agua por coagulación, el agua debe ser pasada a través de filtros. La filtración remueve las partículas finas suspendidas que no han sido retenidas en los procesos de coagulación y sedimentación. Filtros de carbón activado serán necesarios para remover trazas de materia orgánica o excesos de cloro residual.

Luego de remover los materiales suspendidos en el agua cruda, la dureza o los materiales que originan las incrustaciones continúan en solución. Tratamientos adicionales se requieren para remover estos materiales. Estos tratamientos consisten en precipitar los constituyentes de la dureza o intercambiar la dureza por iones no duros en un proceso llamado intercambio iónico.

### **2.5.6 PURGAS**

El caldero recibe el agua de alimentación, la cual puede estar constituida por una proporción variable de agua condensada recuperada, denominada agua de retorno y de agua nueva, más o menos depurada, llamada agua de reposición.

El agua de alimentación se transforma en vapor que se escapa de la zona de vaporización hacia el exterior. Se puede considerar que este vapor está constituido por moléculas de agua pura. En realidad contiene con mucha frecuencia gotitas de agua y gases, especialmente gas carbónico debido a la descomposición de los carbonatos y a presiones elevadas, transporta sales volatilizadas por arrastre en el vapor, cloruros y sílice.

El agua que se mantiene líquida en la parte interior del caldero, se concentra de todas las sustancias extrañas que contenía el agua que ha sido vaporizada (a excepción de las que han sido arrastradas con el vapor). Las impurezas se concentran, por lo tanto, cada vez más en la fase líquida si no se efectúa una desconcentración sistemática, denominada purga, vertiendo al drenaje una parte del agua del caldero.

#### **2.5.6.1 Tipos de purgas**

Existen dos tipos principales de purga del agua del caldero: purga manual intermitente y purga continua.

#### *2.5.6.1.1 Purga manual*

Es necesaria para controlar puntualmente la concentración de sólidos en el agua del caldero o cuando la purga continua no ha sido instalada. Esta purga es usualmente localizada en la parte baja del caldero de tal manera que a más de bajar la concentración de los sólidos disueltos del agua del caldero, también remueve una porción de lodos, los cuales se concentran en la parte inferior del mismo. En la práctica, la válvula de purga de fondo es abierta periódicamente de acuerdo con el programa de operación y/o el control de los análisis químicos.

#### *2.5.6.1.2 Purga continua*

La purga continua implica una remoción continua de agua concentrada del caldero. Este tipo de purga ofrece muchas ventajas con la purga manual. Permite mantener bajo control permanente las concentraciones del agua del caldero. En muchos casos puede permitir un ahorro de energía con la instalación de equipos para recuperar su calor, cuando la presión del vapor es baja o cuando su calor se pueda aprovechar en un precalentamiento del agua de alimentación.

## **CAPÍTULO 3**

### **PARÁMETROS DE DISEÑO Y SELECCIÓN**

#### **3.1. PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DEL CALDERO**

El diseño de un caldero depende en general de las especificaciones requeridas para una determinada aplicación que se desee ejecutar. De esta manera se podrá seleccionar el tipo de caldero más idóneo y su capacidad de operación. Para este proyecto se construirá un caldero eléctrico ya que su construcción y automatización es factible de realizarse, tomando en cuenta que los requerimientos de producción de vapor no son sustanciales debido al carácter didáctico del equipo.

Los principios básicos de operación de esta unidad generadora de vapor, son los siguientes:

- La conversión del potencial energético del elemento calefactor en energía térmica.
- La transmisión de la energía térmica al agua, que se puede emplear posteriormente en un trabajo útil.
- El control automático que permite un funcionamiento seguro y confiable del equipo bajo los parámetros de diseño.

El diseño de un proyecto obedece al sector al cual se encuentre enfocado. Este proyecto constituye un prototipo didáctico con amplia aplicación en el sector productivo, por tanto debe regirse de acuerdo con los siguientes aspectos:

- Grado de cumplimiento de las especificaciones técnicas
- Demanda energética
- Recursos humanos disponibles
- Recursos económicos
- Capacidad de satisfacción

### 3.2 ESPECIFICACIONES REQUERIDAS PARA EL EQUIPO

- Presión nominal de trabajo: 70 psi
- Presión máxima de trabajo ( $P_{ts}$ ): 80 psi
- Presión mínima de trabajo ( $P_{ti}$ ): 60 psi
- Presión de alivio de seguridad ( $P_{al}$ ): 120 psi
- Capacidad de almacenamiento del tanque: 35 – 40 lt.
- Tipo de control: Semiautomático con un PLC
- Tipo de generación: Vapor Saturado
- Nivel máximo de líquido: 70% del volumen total del tanque
- Nivel mínimo de líquido: 50% del volumen total del tanque
- Nivel crítico de líquido: 40% del volumen total del tanque

### 3.3 CÁLCULOS

#### 3.3.1 CÁLCULO DE LA POTENCIA NECESARIA PARA LLEGAR AL PUNTO DE TRABAJO SUPERIOR (80 psi) A PARTIR DEL PUNTO INICIAL (P atm)

Para este cálculo se utiliza el método del balance de energías. Éste indica que la suma entre la energía generada y la energía de entrada tiene que ser igual a la suma entre la energía de salida y la variación de la energía interna. Todo esto se realiza respecto a un sistema de control. En este caso el sistema de control es el conjunto tanque – agua – vapor, de esta manera se tiene:

$$E_e^i + E_g^i = E_s^i + E_a^i \quad (3.1)$$

Donde:

$E_e^i$ : Energía de entrada

$E_g^i$ : Energía generada

$E_s^i$ : Energía de salida

$E_a^i$ : Cambio de energía interna

La energía de entrada es igual a cero, puesto que el sistema va estar a mayor temperatura que el medio externo, por tanto no puede haber transferencia de calor desde el medio frío hacia el sistema más caliente:

$$\dot{E}_e = 0$$

La energía generada será igual a la potencia que brinde el elemento calefactor hacia el sistema:

$$\dot{E}_g = P$$

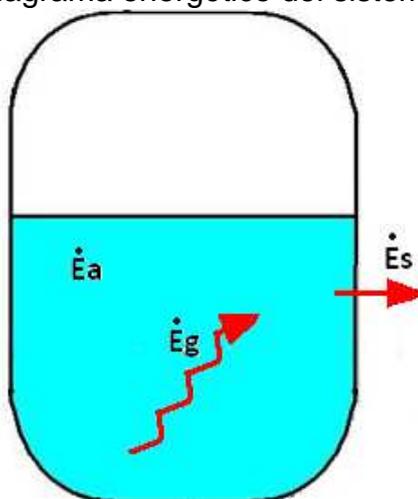
La energía de salida del sistema es igual a la energía calórica debido a las pérdidas térmicas desde el sistema caliente hacia los alrededores:

$$\dot{E}_s = Q_p$$

Finalmente, la variación de la energía interna puede determinarse mediante parámetros termodinámicos del proceso de calentamiento y ebullición que sucede dentro del sistema:

$$\dot{E}_a = \left[ m_T \cdot C_F (T_{sat} - T_D) + m_A (h_{f@80psi} - h_{f@P_{atm}}) + m_V (h_{g@80psi} - h_{f@P_{atm}}) \right] \frac{1}{t} \quad (3.2)$$

Figura 3.1 Diagrama energético del sistema de control



Fuente: Propia

Una vez realizado el balance energético se tiene:

$$P = \left[ m_T C_P (T_{\text{sat}} - T_o) + m_A (h_{f@80\text{psi}} - h_{f@P.\text{atm.}}) + m_v (h_{g@80\text{psi}} - h_{f@P.\text{atm.}}) \right] \frac{1}{t} + Q_P \quad (3.3)$$

Donde:

P: Potencia de calentamiento requerida

$m_T$ : Masa total de agua y vapor

$m_A$ : Masa de agua líquida

$m_v$ : Masa de vapor saturado

$C_P$ : Calor específico a presión constante del agua

$T_{\text{sat}}$ : Temperatura de saturación a presión atmosférica

$T_o$ : Temperatura inicial del agua fría

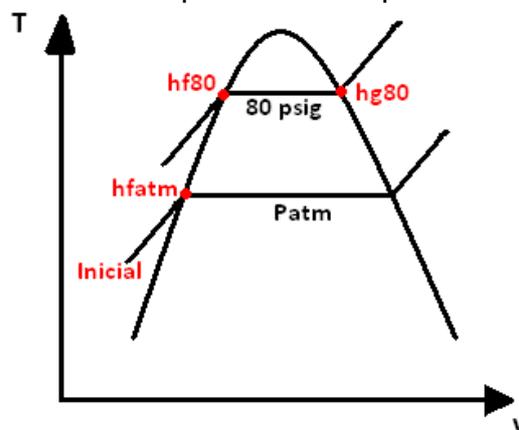
$h_{f@P.\text{atm.}}$ : Entalpía de líquido saturado a presión atmosférica

$h_{f@80\text{psi}}$ : Entalpía de líquido saturado a 80 psi

$h_{g@80\text{psi}}$ : Entalpía de vapor saturado a 80 psi

$Q_P$ : Flujo de calor de pérdidas térmicas

Figura 3.2 Volumen específico – temperatura del proceso



Fuente: Propia

Para la fórmula anterior, se conoce a partir de las tablas termodinámicas los datos de temperaturas y entalpías válidos para las presiones atmosféricas y de trabajo superior (80 psi):

$$P_{\text{atm}} = 10,4 \text{ psia} = 71,71 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{ts}} = 90,4 \text{ psia} = 623,29 \text{ kPa}^9$$

$$C_P = 4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}^{10}$$

$$T_{\text{sat}} = 91 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{f@P.\text{atm}} = 379,15 \text{ kJ/kg}^{11}$$

$$h_{f@80 \text{ psi}} = 676,95 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{g@80 \text{ psi}} = 2758,43 \text{ kJ/kg}$$

Para conocer los valores aproximados de las masas de vapor, de agua y total se toma como base las relaciones de volúmenes establecidas en los requerimientos y en los volúmenes específicos de saturación a la presión de trabajo superior (80 psi). De esta manera se tienen las siguientes ecuaciones:

$$m_T = m_A + m_v \quad (3.4)$$

$$V_T = V_A + V_V \quad (3.5)$$

$$V_V = 0,3 V_T \quad (3.6)$$

$$V_A = 0,7 V_T \quad (3.7)$$

$$V_A = v_f \cdot m_A \quad (3.8)$$

$$V_V = v_g \cdot m_v \quad (3.9)$$

---

<sup>9</sup> Presión de trabajo superior absoluta

<sup>10</sup> INCROPERA, F.; Fundamentos de Transferencia de Calor; Pearson; México; 1999; p. 828

<sup>11</sup> CENGEL, Y.; Termodinámica; McGraw-Hill; México; 1999; p. 654

Donde:

$m_T$ : Masa total de agua y vapor

$m_A$ : Masa de agua líquida

$m_V$ : Masa de vapor saturado

$V_T$ : Volumen total del tanque

$V_A$ : Volumen de agua líquida en el tanque

$V_V$ : Volumen de vapor saturado en el tanque

$v_f$ : Volumen específico de líquido saturado

$v_g$ : Volumen específico de vapor saturado

El volumen total del tanque es un dato conocido y los volúmenes específicos de saturación se obtienen de las tablas termodinámicas para la presión de trabajo superior (80 psi):

$$V_T = 0,037 \text{ m}^3 = 37 \text{ lt}$$

$$v_f = 0,0011024 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0,30499 \text{ m}^3/\text{kg}$$

De esta manera se obtienen los siguientes resultados:

$$V_A = 0,0259 \text{ m}^3 = 25,9 \text{ lt}$$

$$V_V = 0,0111 \text{ m}^3 = 11,1 \text{ lt}$$

$$m_A = 23,376 \text{ kg}$$

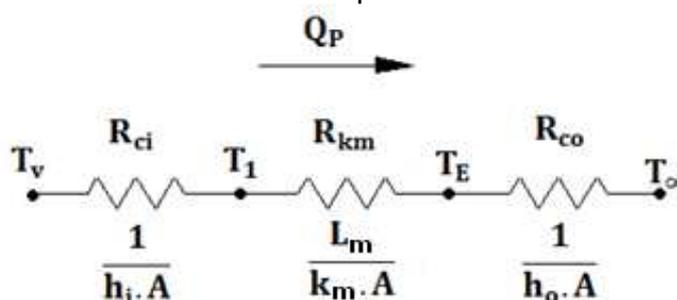
$$m_V = 0,0407 \text{ kg}$$

$$m_T = 23,4161 \text{ kg}$$

### 3.3.1.1 Cálculo de pérdidas sin aislante

Este cálculo de pérdidas se efectúa considerando el punto de trabajo superior (80 psi) como estado estable. Si bien todo el tiempo las condiciones de presión y temperatura seguirán variando, este cálculo ayudará a predecir los máximos valores de pérdidas de calor del caldero.

Figura 3.3 Resistencias térmicas equivalentes en el caso sin aislante



Fuente: Propia

$$T_v - T_{\infty} = Q_P \cdot R_{TE} \quad (3.10)$$

$$Q_P = \frac{T_v - T_{\infty}}{R_{TE}} \quad (3.11)$$

Donde:

$T_v$ : Temperatura de vapor saturado a 80 psi

$T_{\infty}$ : Temperatura promedio del aire

$Q_P$ : Flujo de calor de pérdidas

$R_{TE}$ : Resistencia térmica equivalente

Los datos conocidos son la temperatura de vapor saturado, obtenida de tablas, y la temperatura del aire, la cual se asume como un valor promedio característico:

$$T_v = 160,32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\infty} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La resistencia térmica equivalente se define como la relación entre una diferencia de temperaturas (potencial térmico) y el flujo de energía calórica. Es la suma de las resistencias térmicas de los mecanismos de transferencia de calor, en este caso: convección evaporativa, conducción de la pared del tanque y convección externa con el aire. Entonces:

$$R_{TE} = R_{ci} + R_{km} + R_{co} \quad (3.12)$$

$$R_{TE} = \frac{1}{h_i \cdot A} + \frac{L_m}{k_m \cdot A} + \frac{1}{h_o \cdot A} \quad (3.13)$$

Donde:

$R_{ci}$ : Resistencia de convección evaporativa

$R_{km}$ : Resistencia de conducción de la pared

$R_{co}$ : Resistencia de convección externa

$h_i$ : Coeficiente de convección evaporativa (vapor con superficie interna)

$h_o$ : Coeficiente de convección externa (aire con superficie externa)

$L_m$ : Espesor de la pared del tanque

$k_m$ : Conductividad térmica del acero del tanque

$A$ : Área de la pared del tanque (se asume una sola para las tres resistencias debido al pequeño espesor)

De la anterior ecuación se conocen los datos de la conductividad del acero a partir de tablas, el espesor de la pared del tanque y el área de la pared (calculada a partir de sus medidas):

$$k_m = 56,7 \text{ W/m.K}^{12}$$

$$L_m = 0,0025 \text{ m}$$

$$A = 0,459 \text{ m}^2$$

---

<sup>12</sup> INCROPERA, F.; Op. cit.; p. 827

El coeficiente de convección evaporativa es un parámetro de cálculo muy complejo. Las industrias, especialmente de refrigeración, suelen invertir gran parte de sus recursos económicos y técnicos para obtener experimentalmente este dato. Sin embargo, se conoce que en el caso de fluidos estáticos este valor se puede aproximar a:

$$h_i = 3000 \text{ W/m}^2\text{K}^{13}$$

Para el cálculo del coeficiente de convección externa se recurre al método de parámetros adimensionales:

$$T_f = \frac{T_E + T_\infty}{2} \quad (3.14)$$

Donde:

$T_f$ : Temperatura de película

$T_E$ : Temperatura de la superficie del tanque

$T_\infty$ : Temperatura promedio del aire

Conocida la temperatura promedio del aire y calculada la temperatura de la superficie del tanque por el método de resistencias térmicas, se tiene:

$$T_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_E = 160,04 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_f = 90,02 \text{ }^\circ\text{C} = 363,17 \text{ K}$$

Calculada la temperatura de película  $T_f$  se procede al cálculo de los parámetros adimensionales con las propiedades del aire a esa temperatura:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_E - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad (3.15)$$

---

<sup>13</sup> STOECKER, W.; Refrigeración y Acondicionamiento de Aire; McGraw-Hill; Madrid; 1985; p. 179

Donde:

$Ra_L$ : Número de Rayleigh

$g$ : Constante de gravedad

$\beta$ : Coeficiente de expansión volumétrica

$L$ : Longitud del área de convección

$\alpha$ : Termodifusividad

$\nu$ : Viscosidad cinemática

Estos valores (buscados en tablas<sup>14</sup>) son los siguientes y permiten el cálculo de Rayleigh:

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\beta = 0,00277 \text{ K}^{-1}$$

$$L = 0,45 \text{ m}$$

$$\alpha = 31,73 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\nu = 22,12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Ra_L = 4,95 \times 10^8$$

Con el número de Rayleigh y buscando el número de Prandtl en tablas se procede al cálculo del número de Nusselt:

$$Nu_L = 0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492 / Pr)^{4/3}]^{1/4}} \quad (3.16)$$

Donde:

$Nu_L$ : Número de Nusselt

$Pr$ : Número de Prandtl

---

<sup>14</sup> INCROPERA, F.; Op. cit.; p. 839

Los números de Nusselt y Prandtl tienen los siguientes valores:

$$Pr = 0,6978^{15}$$

$$Nu_L = 77,218$$

Con el número de Nusselt y Rayleigh se recurre a gráficas<sup>16</sup> en donde se obtienen las constantes para los diferentes valores de estos números de flujo laminar o turbulento. De esta manera se tiene la siguiente fórmula para el coeficiente de convección:

$$h_o = \frac{C \cdot Ra_L^n \cdot k}{L} \quad (3.17)$$

Donde:

$h_o$ : Coeficiente de convección externa (aire con superficie externa)

C, n: Constantes para el caso laminar

k: Conductividad térmica del aire

Resultando:

$$C = 0,10$$

$$n = 1/3$$

$$k = 30,83 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}$$

$$h_o = 5,42 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### 3.3.1.1.1 Resultados

$$Q_p = 0,345 \text{ kW}$$

---

<sup>15</sup> Ibid; p. 839

<sup>16</sup> Ibid; p. 493

Si se asume un tiempo deseado de calentamiento de 50 min:

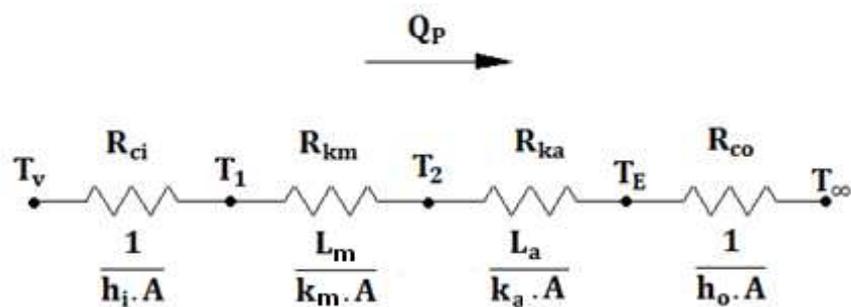
$P = 5,01 \text{ kW}$     **Valor de potencia requerida si no hubiera aislante**

### 3.3.1.2 Cálculo del espesor de aislamiento

Una vez calculado el máximo flujo de calor de pérdidas, correspondiente al punto de trabajo superior (80 psi), se debe asumir un flujo de calor de pérdidas menor al anterior, lo cual indicaría que se reducen sustancialmente las pérdidas térmicas. Esto es posible aislando el tanque con un material cuya conductividad térmica sea muy baja, permitiendo el aislamiento térmico.

De esta manera con este nuevo valor se realiza el cálculo de las resistencias térmicas equivalentes. Estas resistencias son similares en concepto a las del cálculo anterior, añadiendo una nueva resistencia que será la de conducción del aislante.

Figura 3.4 Resistencias térmicas equivalentes en el caso con aislante



Fuente: Propia

$$T_v - T_{\infty} = Q_P \cdot R_{TE} \quad (3.18)$$

$$Q_P = \frac{T_v - T_{\infty}}{R_{TE}} \quad (3.19)$$

Donde:

$T_v$ : Temperatura de vapor saturado a 80 psi

$T_\infty$ : Temperatura promedio del aire

$Q_p$ : Flujo de calor de pérdidas

$R_{TE}$ : Resistencia térmica equivalente

Se conoce:

$$T_v = 160,32 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

La resistencia térmica equivalente es la suma de las resistencias térmicas de los mecanismos de transferencia de calor, en este caso: convección evaporativa, conducción de la pared del tanque, conducción del aislante y convección externa con el aire. Entonces:

$$R_{TE} = R_{ci} + R_{km} + R_{ka} + R_{co} \quad (3.20)$$

$$R_{TE} = \frac{1}{h_i A} + \frac{L_m}{k_m A} + \frac{L_a}{k_a A_a} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (3.21)$$

Donde:

$R_{ci}$ : Resistencia de convección evaporativa

$R_{km}$ : Resistencia de conducción de la pared

$R_{ka}$ : Resistencia de conducción del aislante

$R_{co}$ : Resistencia de convección externa

$h_i$ : Coeficiente de convección evaporativa (vapor con superficie interna)

$h_o$ : Coeficiente de convección externa (aire con superficie externa)

$L_m$ : Espesor de la pared del tanque

$L_a$ : Espesor del aislante

$k_m$ : Conductividad térmica del acero del tanque

$k_a$ : Conductividad térmica del aislante del tanque

A: Área de la pared del tanque

$A_a$ : Área promedio del aislante

$A_e$ : Área exterior con aislante

Se conoce:

$$k_m = 56,7 \text{ W/m.K}$$

$$k_a = 0,038 \text{ W/m.K}^{17}$$

$$L_m = 0,0025 \text{ m}$$

$$A = 0,459 \text{ m}^2$$

El coeficiente de convección evaporativa se asume igual al valor del caso anterior:

$$h_i = 3000 \text{ W/m}^2$$

Al no conocer la temperatura de la superficie una vez que se añada el aislante al tanque, el cálculo resulta iterativo. Sin embargo, éste se puede facilitar si se asume que dicha temperatura se reduce a 50 °C, facilitando la manipulación del equipo. De igual manera, como se indicó se asume pérdidas menores a las del caso anterior, resultando:

$$T_E = 50 \text{ °C}$$

$$Q_P = 0,1 \text{ kW}$$

De esta manera se procede al cálculo del coeficiente de convección externa por el método de parámetros adimensionales para el presente caso:

---

<sup>17</sup> Ibid; p.834

$$T_f = \frac{T_E + T_{\infty}}{2} \quad (3.22)$$

$$T_E = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\infty} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_f = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} = 308,15 \text{ K}$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_E - T_{\infty})L^3}{\alpha\nu} \quad (3.23)$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\beta = 0,00325 \text{ K}^{-1}$$

$$L = 0,45 \text{ m}$$

$$\alpha = 23,71 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\nu = 16,71 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,706$$

$$Ra_L = 2,2 \times 10^8$$

$$Nu_L = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/5}} \quad (3.24)$$

$$Nu_L = 63,27$$

$$h_c = \frac{C \cdot Ra_L^n \cdot k}{L} \quad (3.25)$$

$$C = 0,10$$

$$n = 1/3$$

$$k = 26,9 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}$$

$$h_o = 3,61 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### 3.3.1.2.1 Resultados

Después de algunas iteraciones se llega a la conclusión de que se requiere un aislante de 20 mm de espesor aproximadamente para reducir las pérdidas al valor de 100 W.

$$L_a \approx 20 \text{ mm}$$

Si se asume un tiempo deseado de calentamiento de 50 min:

$$P = 4,77 \text{ kW} \quad \text{Valor de potencia requerida con aislante}$$

### 3.3.2 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA PARA AGUA

La presión de diseño de la bomba de agua de alimentación será ligeramente superior a la presión de accionamiento de la válvula de seguridad por alta presión de vapor, es decir:

$$P_{al} = 120 \text{ psi} = 827,37 \text{ kPa}$$

Generalmente las bombas de engranajes, permiten obtener caudales en un amplio rango, desde 1 a 600 l/min. Se asume el siguiente caudal considerando que los requerimientos de agua de alimentación son relativamente pequeños, es decir:

$$Q = 50 \text{ l/min} = 0,00083 \text{ m}^3/\text{s}$$

Adicionalmente se considera un rendimiento de la bomba del 70%, es decir:

$$n_b = 0,7$$

Con las consideraciones antes realizadas y de una manera sencilla, se puede realizar una aproximación de la potencia de la bomba, asumiendo también que las pérdidas en tuberías y accesorios son pequeñas.

$$P_{ot} = \frac{P_{al} \cdot Q}{\eta_b} \quad (3.26)$$

Donde:

$P_{ot}$ : Potencia de la bomba

$P_{al}$ : Presión de alivio o de accionamiento de la válvula de seguridad

$Q$ : Caudal o flujo de agua de alimentación

$\eta_b$ : Rendimiento de la bomba

Se obtiene:

$$P_{ot} = 0,98 \text{ kW} = 1,31 \text{ hp} \quad \text{Valor de potencia requerida para la bomba}$$

La bomba de engranajes debe ser accionada por medio de un motor eléctrico, el cual debe tener una potencia ligeramente superior a la potencia calculada para la bomba, debido a las pérdidas mecánicas y eléctricas.

### 3.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Una vez que mediante los cálculos se ha determinado el diseño apropiado del caldero, resulta conveniente seleccionar los componentes que mejor se ajustan a los resultados obtenidos. Esto constituye una tendencia técnica utilizada en la construcción de equipos ya que desde el punto de vista económico y práctico resulta más conveniente adquirir un elemento disponible en el mercado que elaborarlo a partir de insumos primarios. Por lo tanto, durante la construcción del proyecto se dará prioridad a la selección de sus componentes respecto a una posible fabricación de los mismos, para un posterior ensamblaje de todo el equipo.

El caldero eléctrico y todos sus sistemas auxiliares se podrían implementar por diferentes vías y alternativas. En el mercado y en la industria existe una amplia gama de opciones, las cuales deben ser analizadas considerando diversos criterios de selección. No todas las opciones son viables para este proyecto, por lo cual se debe escoger la alternativa más efectiva desde el punto de vista técnico y económico.

Para facilitar la selección es necesario considerar al equipo en su totalidad como un conjunto de sistemas, cada uno de los cuales cumple una función específica dentro de estándares predeterminados. De esta manera se ha determinado que los principales sistemas (y sus componentes) que conforman el caldero didáctico de vapor saturado son los siguientes:

- Sistema de Almacenamiento de Agua y Vapor
  - Tanque caldero
  - Aislante térmico para el tanque
- Sistema de Alimentación de Agua
  - Bomba para agua
  - Accionamiento de la bomba
- Sistema de Calentamiento
  - Elemento calefactor
  - Fuente de alimentación de energía eléctrica
- Sistema de Control
  - Controlador
  - Medidor de presión interna del tanque
  - Medidor de nivel de líquido
  - Actuador para el accionamiento de la bomba
  - Actuador para el elemento calefactor
  - Actuador de sobrepresión (válvula de seguridad)
  - Control de caudal de entrada de agua
  - Control de caudal de salida de vapor
- Sistema de Purga
  - Válvula para purga

### **3.4.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA Y VAPOR**

La función principal de este sistema, será proporcionar un medio por el cual el calor generado por el sistema de calentamiento, no se disipe al exterior y permita que el agua almacenada pueda ganar energía calórica para obtener vapor. También soportará la presión del vapor generada en su interior mediante un diseño estructural adecuado.

El diseño de este sistema permitirá que los precipitados o sedimentos se depositen en donde no afecten a la superficie principal de transferencia de calor y de donde serán evacuados por purga o por limpiezas periódicas.

#### **3.4.1.1 Tanque caldero**

Constituye una coraza metálica capaz de almacenar el agua y vapor generado en el interior del mismo, en las condiciones de presión, temperatura y volumen específico para las cuales será diseñado. La cantidad de agua contenida en el tanque caldero determinará la rapidez con la que puede calentarse para alcanzar las condiciones de producción de vapor.

Los materiales y los métodos de construcción estarán controlados por los requisitos para el trabajo a presión propio de este tipo de caldero. A continuación se muestran las alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.1 Alternativas y criterios de selección para el tanque caldero

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Tanque de GLP (uso doméstico)	<b>I</b>	Cumple especificaciones para trabajo de caldero
<b>B</b>	Tanque de presión para agua	<b>II</b>	Inversión necesaria
<b>C</b>	Tanque fabricado para el proyecto	<b>III</b>	Disponibilidad en el mercado
		<b>IV</b>	Adecuado para el proyecto
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.2 Asignación de valores y ponderación para la selección del tanque caldero

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	8	8	10	9	8	30
<b>B</b>	7	8	8	8	8	25	<b>II</b>
<b>C</b>	9	5	5	10	5	15	<b>III</b>
						20	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	24	21	23	27	21	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.3 Normalización de la tabla 3.2

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
<b>A</b>	0,33	0,38	0,43	0,33	0,38	0,30	<b>I</b>
<b>B</b>	0,29	0,38	0,35	0,30	0,38	0,25	<b>II</b>
<b>C</b>	0,38	0,24	0,22	0,37	0,24	0,15	<b>III</b>
						0,20	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, la alternativa A, correspondiente al tanque de GLP (uso doméstico). Este tanque está elaborado en lámina de acero y está diseñado para soportar presiones mayores a la presión nominal de trabajo de este caldero.

Tabla 3.4 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,36
<b>B=</b>	0,33
<b>C=</b>	0,31

Fuente: Propia

### 3.4.1.2 Aislante térmico para el tanque

La generación de calor en el interior del tanque resulta ineficiente si las pérdidas térmicas hacia los alrededores son considerablemente grandes. Por tal motivo, es necesario emplear un aislante térmico que reduzca el flujo de calor hacia el exterior del tanque, acelere el proceso de calentamiento y reduzca la cantidad de energía necesaria para el estabilizar este proceso. Además así se evita que las

personas que manejen el equipo, estén expuestas a elevadas temperaturas. A continuación se muestran las alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.5 Alternativas y criterios de selección para el aislante térmico

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Lana de vidrio	<b>I</b>	Mayor aislamiento térmico
<b>B</b>	Poliuretano	<b>II</b>	Inversión necesaria
<b>C</b>	Yeso	<b>III</b>	Seguridad en el manejo del equipo
<b>D</b>	Sin aislante	<b>IV</b>	Disponibilidad en el mercado
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.6 Asignación de valores y ponderación para la selección del aislante térmico

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	9	8	9	8	9	30
<b>B</b>	10	8	9	6	9	25	<b>II</b>
<b>C</b>	7	7	8	7	9	20	<b>III</b>
<b>D</b>	1	10	2	10	9	15	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	27	33	28	31	36	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.7 Normalización de la tabla 3.6

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,33	0,24	0,32	0,26	0,25	0,30
<b>B</b>	0,37	0,24	0,32	0,19	0,25	0,25	<b>II</b>
<b>C</b>	0,26	0,21	0,29	0,23	0,25	0,20	<b>III</b>
<b>D</b>	0,04	0,31	0,07	0,32	0,25	0,15	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, las alternativas A y B, correspondientes a la lana de vidrio y poliuretano. Dicho aislante térmico seleccionado deberá ser instalado sobre el tanque de acuerdo al espesor calculado anteriormente.

Tabla 3.8 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,29
<b>B=</b>	0,29
<b>C=</b>	0,25
<b>D=</b>	0,17

Fuente: Propia

### 3.4.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA

El agua que se introducirá al caldero para ser convertida en vapor, se la conoce como agua de alimentación. Como esta última será provista directamente del suministro público, habría la necesidad de liberarla de precipitados, sólidos en suspensión, sustancias incrustantes y otros elementos contaminantes. Sin

embargo debido a que la utilización del caldero tiene fines didácticos no se tomará en cuenta este proceso, excepto en el sistema de purga más adelante analizado.

El suministro de agua al caldero se realizará con una bomba hidráulica, y su flujo se regulará de manera que el caudal sea pequeño y permita la observación del proceso. La presión de diseño de la bomba de agua de alimentación será ligeramente superior a la máxima presión de vapor que podría alcanzar el caldero en condiciones extremas, es decir, será superior a la presión de alivio de la válvula de seguridad del caldero por alta presión de vapor.

### 3.4.2.1 Bomba para agua

Tomando en cuenta los requerimientos de alimentación de agua del proyecto se han considerado las siguientes alternativas y criterios de selección como los más adecuados:

Tabla 3.9 Alternativas y criterios de selección para la bomba para agua

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
A	Bomba de engranajes	I	Cumple especificaciones de caudal y presión
B	Bomba centrífuga	II	Inversión necesaria
		III	Seguridad en el bombeo de agua
		IV	Facilidades didácticas del proyecto
		V	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.10 Asignación de valores y ponderación para la selección de la bomba para agua

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
<b>A</b>	8	8	7	9	8	30	<b>I</b>
<b>B</b>	6	8	8	6	7	25	<b>II</b>
						25	<b>III</b>
						5	<b>IV</b>
						15	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	14	16	15	15	15	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.11 Normalización de la tabla 3.10

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
<b>A</b>	0,57	0,50	0,47	0,60	0,53	0,30	<b>I</b>
<b>B</b>	0,43	0,50	0,53	0,40	0,47	0,25	<b>II</b>
						0,25	<b>III</b>
						0,05	<b>IV</b>
						0,15	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, la alternativa A, correspondiente a la bomba de engranajes (de desplazamiento positivo).

Tabla 3.12 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,52
<b>B=</b>	0,48

Fuente: Propia

### 3.4.2.2 Accionamiento de la bomba

Debido a que la bomba seleccionada es una de desplazamiento positivo, ésta requiere ser accionada mecánicamente por lo que se han considerado las siguientes alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.13 Alternativas y criterios de selección para el accionamiento de la bomba

<b>Alternativas</b>		<b>Criterios de selección</b>	
<b>Código</b>	<b>Alternativa</b>	<b>Código</b>	<b>Criterio</b>
<b>A</b>	Motor eléctrico	<b>I</b>	Cumple especificaciones de torque y revoluciones
<b>B</b>	Accionamiento manual	<b>II</b>	Inversión necesaria
		<b>III</b>	Tiempo requerido de accionamiento
		<b>IV</b>	Posibilidades de automatización
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.14 Asignación de valores y ponderación para la selección del accionamiento de la bomba

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
<b>A</b>	9	6	9	9	8	35	<b>I</b>
<b>B</b>	4	8	4	1	6	20	<b>II</b>
						20	<b>III</b>
						15	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	13	14	13	10	14	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.15 Normalización de la tabla 3.14

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
<b>A</b>	0,69	0,43	0,69	0,90	0,57	0,35	<b>I</b>
<b>B</b>	0,31	0,57	0,31	0,10	0,43	0,20	<b>II</b>
						0,20	<b>III</b>
						0,15	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

De esta manera, con amplio margen de diferencia se obtiene que la mejor opción es la alternativa A, el accionamiento de la bomba mediante un motor eléctrico, ya que éste brinda la potencia necesaria para su funcionamiento.

Tabla 3.16 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,66
<b>B=</b>	0,34

Fuente: Propia

### 3.4.3 SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Es indispensable para cualquier tipo de caldero de vapor tener un sistema que brinde la energía necesaria para que el agua de alimentación eleve su temperatura y cambie de fase a la de vapor saturado. Los medios más comunes para lograr este proceso han sido mediante combustión, pero actualmente hay un creciente interés hacia las aplicaciones con energía eléctrica.

La finalidad del sistema de calentamiento es lograr que la mayor parte de la energía calórica generada se transfiera al medio líquido, logrando así una eficiencia energética que satisfaga la inversión técnica y económica del proyecto. La selección de este sistema debe basarse en los siguientes aspectos:

- Disponibilidad económica
- Capacidad de generación de vapor
- Variables termodinámicas del proceso
- Dimensiones del equipo

#### 3.4.3.1 Elemento calefactor

De acuerdo con el diseño del caldero, ha sido necesario considerar dentro del sistema de calentamiento únicamente un elemento calefactor. Éste proporcionará el calor necesario al agua almacenada en el tanque caldero para obtener vapor saturado. Considerando los elementos de juicio anteriores, se presentan las siguientes alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.17 Alternativas y criterios de selección para el elemento calefactor

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Resistencia eléctrica	<b>I</b>	Facilidad para alcanzar el punto de trabajo
<b>B</b>	Quemador de combustible (quemador simple)	<b>II</b>	Inversión necesaria
		<b>III</b>	Facilidad de mantenimiento
		<b>IV</b>	Facilidad de automatización
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.18 Asignación de valores y ponderación para la selección del elemento calefactor

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	10	9	9	9	8	30
<b>B</b>	9	6	4	6	6	25	<b>II</b>
						15	<b>III</b>
						20	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	19	15	13	15	14	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.19 Normalización de la tabla 3.18

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,53	0,60	0,69	0,60	0,57	0,30
<b>B</b>	0,47	0,40	0,31	0,40	0,43	0,25	<b>II</b>
						0,15	<b>III</b>
						0,20	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se ha obtenido como mejor opción, la alternativa A, correspondiente a una resistencia eléctrica calefactora. La potencia de la resistencia deberá ser escogida de acuerdo a los cálculos precedentes en este capítulo.

Tabla 3.20 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,59
<b>B=</b>	0,41

Fuente: Propia

### 3.4.3.2 Fuente de alimentación de energía eléctrica

La fuente seleccionada para el proceso de calentamiento es la red eléctrica de 220 V con la que cuenta el Laboratorio de Automatización Industrial, ya que resultaría poco conveniente utilizar una fuente de alimentación propia, debido al alto costo de inversión y mantenimiento. Pese a que en dicho laboratorio también se halla disponible la red de 110 V, se ha descartado esta opción debido a que las resistencias eléctricas que trabajan con este voltaje son de baja potencia.

### **3.4.4 SISTEMA DE CONTROL**

En el funcionamiento del caldero es de trascendental importancia controlar a cada instante todos los sistemas y variables del equipo. Es por este motivo que se debe implementar un sistema de control que permita brindar seguridad y un desempeño óptimo del equipo según las especificaciones requeridas.

Este sistema puede ser de diferentes tipos: manual, semiautomático o automático. Uno de los objetivos principales del proyecto es lograr una automatización lo más amplia posible de los sistemas principales del caldero. Esta automatización debe tener un mando central que permita un funcionamiento conjunto y coherente de todos los sistemas. Sin embargo, en el análisis preliminar se determinó que el sistema de control más viable para el proyecto es el semiautomático, ya que algunos controles serán del tipo manual, sin alterar el proceso de automatización del caldero didáctico de vapor saturado.

#### **3.4.4.1 Controlador**

Se ha escogido un PLC de marca Allen-Bradley Micrologix 1100 debido a que es un equipo que posee el Laboratorio de Automatización Industrial de Procesos Mecánicos de la FIM y se ha visto la necesidad de utilizarlo en aplicaciones prácticas con fines didácticos. Además se cuenta con el respectivo software licenciado por el fabricante del equipo para su programación y uso.

Se ha constatado que el PLC disponible se encuentra en buen estado y en condiciones operativas. Por lo tanto, este dispositivo puede cumplir las especificaciones requeridas para la automatización del equipo.

Además, es necesario alimentar a este PLC con una fuente de 24 V de corriente continua, la cual permitirá también dar la energía necesaria para el funcionamiento de los sensores que se instalarán para el control automático del equipo.

### 3.4.4.2 Medidor de presión interna del tanque

La finalidad de este medidor es detectar los niveles máximo y mínimo de presión que se han establecido en las especificaciones requeridas para el diseño del equipo. Este sensor deberá enviar una señal ya sea analógica o digital al PLC, con la finalidad de que éste ejecute ciertas acciones (encendido/apagado de la resistencia eléctrica calefactora) cuando los niveles de presión se encuentren entre los límites establecidos. A continuación se presentan las alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.21 Alternativas y criterios de selección para el medidor de presión interna del tanque

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Presostato de accionamiento mecánico	<b>I</b>	Cumple especificaciones de presión
<b>B</b>	Presostato electrónico digital	<b>II</b>	Inversión necesaria
<b>C</b>	Presostato analógico	<b>III</b>	Disponibilidad en el mercado
		<b>IV</b>	Seguridad de accionamiento
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.22 Asignación de valores y ponderación para la selección del medidor de presión interna del tanque

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	9	10	9	7	9	30
<b>B</b>	9	2	5	9	8	30	<b>II</b>
<b>C</b>	9	3	6	9	7	10	<b>III</b>
						20	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	27	15	20	25	24	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.23 Normalización de la tabla 3.22

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,33	0,67	0,45	0,28	0,38	0,30
<b>B</b>	0,33	0,13	0,25	0,36	0,33	0,30	<b>II</b>
<b>C</b>	0,33	0,20	0,30	0,36	0,29	0,10	<b>III</b>
						0,20	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, la alternativa A, correspondiente al presostato de accionamiento mecánico. Este tipo de presostato requiere ser regulado manualmente para lograr el rango de presiones establecido en las especificaciones requeridas para el diseño del equipo.

Tabla 3.24 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,44
<b>B=</b>	0,27
<b>C=</b>	0,29

Fuente: Propia

Además por motivos didácticos y de seguridad se ha determinado instalar junto al presostato de accionamiento mecánico un manómetro del tipo tubo de Bourdon, que permita visualizar la medición de presión interna del tanque caldero. De esta manera, el operador podrá observar si la presión sube o no a niveles críticos en caso de falla del control automático o las seguridades.

#### **3.4.4.3 Medidor de nivel de líquido**

La finalidad de este medidor es detectar los niveles máximo, mínimo y crítico de líquido que se encuentra presente en el interior del tanque y que se han establecido en las especificaciones requeridas para el diseño del equipo. Este sensor deberá enviar una señal al PLC, para que éste ejecute la acción de encendido/apagado del motor eléctrico que acciona la bomba para agua, cuando los niveles de líquido se encuentren entre los límites establecidos. A continuación se presentan las alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.25 Alternativas y criterios de selección para el medidor de nivel de líquido

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Tipo sensor óptico	<b>I</b>	Soporta condiciones de funcionamiento del caldero
<b>B</b>	Tipo flotador (magnético)	<b>II</b>	Inversión necesaria
<b>C</b>	Tipo electrodo	<b>III</b>	Disponibilidad en el mercado
<b>D</b>	Tipo flotador (de boya)	<b>IV</b>	Seguridad de accionamiento
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.26 Asignación de valores y ponderación para la selección del medidor de nivel de líquido

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	8	7	8	7	9	30
<b>B</b>	8	6	6	9	8	20	<b>II</b>
<b>C</b>	8	4	6	9	7	15	<b>III</b>
<b>D</b>	10	7	5	5	6	20	<b>IV</b>
						15	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	34	24	25	30	30	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.27 Normalización de la tabla 3.26

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,24	0,29	0,32	0,23	0,30	0,30
<b>B</b>	0,24	0,25	0,24	0,30	0,27	0,20	<b>II</b>
<b>C</b>	0,24	0,17	0,24	0,30	0,23	0,15	<b>III</b>
<b>D</b>	0,28	0,29	0,20	0,17	0,20	0,20	<b>IV</b>
						0,15	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, la alternativa A, correspondiente al medidor de nivel de tipo sensor óptico. Para el funcionamiento del sensor, se utilizará un flotador que deberá ser instalado dentro de un visor de nivel transparente (tubo de vidrio) que será acoplado al tanque caldero; además permitirá observar claramente como varía el nivel de líquido en el interior del mismo.

Tabla 3.28 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,27
<b>B=</b>	0,25
<b>C=</b>	0,24
<b>D=</b>	0,24

Fuente: Propia

#### 3.4.4.4 Actuador para el motor eléctrico

Para la automatización del funcionamiento del motor eléctrico que acciona la bomba para agua, es necesario contar con un elemento que permita activar o

desactivar dicho motor. Este dispositivo debe cumplir con las características eléctricas de conexión tanto al circuito de baja potencia (PLC, 24 V) como al de alta potencia (motor eléctrico, 220 V). A continuación se presentan las alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.29 Alternativas y criterios de selección para el actuador para el motor eléctrico

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Relé	<b>I</b>	Cumple especificaciones eléctricas
<b>B</b>	Contactor	<b>II</b>	Inversión necesaria
		<b>III</b>	Funcionamiento óptimo
		<b>IV</b>	Facilidad de automatización
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.30 Asignación de valores y ponderación para la selección del actuador para el motor eléctrico

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	9	9	8	8	9	30
<b>B</b>	10	6	10	8	7	25	<b>II</b>
						25	<b>III</b>
						10	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	19	15	18	16	16	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.31 Normalización de la tabla 3.30

Criterios de selección Alternativas						PONDERACIÓN	
	I	II	III	IV	V		
<b>A</b>	0,47	0,60	0,44	0,50	0,56	0,30	<b>I</b>
<b>B</b>	0,53	0,40	0,56	0,50	0,44	0,25	<b>II</b>
						0,25	<b>III</b>
						0,10	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se ha obtenido como mejor opción, la alternativa A, correspondiente a un relé. El cual se activará con un voltaje de 24 V y deberá soportar un amperaje mayor al del circuito del motor eléctrico.

Tabla 3.32 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,51
<b>B=</b>	0,49

Fuente: Propia

#### 3.4.4.5 Actuador para la resistencia eléctrica

Para poder automatizar el funcionamiento de la resistencia eléctrica, es necesario contar con un elemento que permita prender o apagar la misma. Este dispositivo debe cumplir con las características eléctricas de conexión tanto al circuito de baja potencia (PLC, 24 V) como al de alta potencia (resistencia eléctrica, 220 V, 5500 W). A continuación se presentan las alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.33 Alternativas y criterios de selección para el actuador para la resistencia eléctrica

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Relé	<b>I</b>	Cumple especificaciones eléctricas
<b>B</b>	Contactor	<b>II</b>	Inversión necesaria
		<b>III</b>	Funcionamiento óptimo
		<b>IV</b>	Facilidad de automatización
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.34 Asignación de valores y ponderación para la selección del actuador para la resistencia eléctrica

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	9	9	8	8	9	30
<b>B</b>	10	6	10	8	7	25	<b>II</b>
						25	<b>III</b>
						10	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	19	15	18	16	16	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.35 Normalización de la tabla 3.34

Criterios de selección Alternativas						PONDERACIÓN	
	I	II	III	IV	V		
<b>A</b>	0,47	0,60	0,44	0,50	0,56	0,30	<b>I</b>
<b>B</b>	0,53	0,40	0,56	0,50	0,44	0,25	<b>II</b>
						0,25	<b>III</b>
						0,10	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se ha obtenido como mejor opción, la alternativa A, correspondiente a un relé. El cual se activará con un voltaje de 24 V y deberá soportar un amperaje mayor al de la resistencia eléctrica.

Tabla 3.36 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,51
<b>B=</b>	0,49

Fuente: Propia

#### 3.4.4.6 Actuador de sobrepresión (válvula de seguridad)

Se empleará una válvula de seguridad que actuará en caso de que la presión llegue a niveles críticos, ya que es un elemento de alivio de presiones activado al alcanzarse la presión crítica interna del tanque y caracterizado por una acción de apertura total de la misma. Además se garantizará la seguridad estructural del caldero y la integridad física de las personas que operan el mismo o se

encuentren cerca del equipo durante su funcionamiento. A continuación se toman en cuenta las siguientes alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.37 Alternativas y criterios de selección para el actuador de sobrepresión

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Válvula mecánica de alivio de presión (resorte)	<b>I</b>	Seguridad de accionamiento por sobrepresión
<b>B</b>	Electroválvula	<b>II</b>	Tiempo de respuesta
<b>C</b>	Válvula manual	<b>III</b>	Inversión necesaria
		<b>IV</b>	Facilidades didácticas del proyecto
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.38 Asignación de valores y ponderación para la selección del actuador de sobrepresión

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	8	7	8	9	9	40
<b>B</b>	8	8	6	7	7	25	<b>II</b>
<b>C</b>	5	4	9	5	9	20	<b>III</b>
						5	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	21	19	23	21	25	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.39 Normalización de la tabla 3.38

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,38	0,37	0,35	0,43	0,36	0,40
<b>B</b>	0,38	0,42	0,26	0,33	0,28	0,25	<b>II</b>
<b>C</b>	0,24	0,21	0,39	0,24	0,36	0,20	<b>III</b>
						0,05	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción la alternativa A, correspondiente a una válvula mecánica de alivio de presión. Su mecanismo de acción consiste en un resorte comprimible que permite el escape de vapor, siempre y cuando la presión interna del tanque alcance cierto valor crítico calibrado.

Tabla 3.40 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,37
<b>B=</b>	0,35
<b>C=</b>	0,28

Fuente: Propia

#### 3.4.4.7 Control de caudal de entrada de agua

Con la bomba seleccionada es posible obtener diferentes valores adecuados de caudal para la aplicación. Sin embargo, con fines didácticos y prácticos (caudal y presión) es necesario colocar una válvula que regule el flujo de agua de alimentación al tanque caldero. A continuación se muestran las alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.41 Alternativas y criterios de selección para el control de caudal de entrada de agua

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Válvula de globo	<b>I</b>	Facilidad para regular el caudal y presión de entrada del agua
<b>B</b>	Válvula de mariposa	<b>II</b>	Inversión necesaria
<b>C</b>	Electroválvula	<b>III</b>	Fiabilidad de funcionamiento
		<b>IV</b>	Disponibilidad en el mercado
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.42 Asignación de valores y ponderación para la selección del control de caudal de entrada de agua

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	9	8	9	9	8	30
<b>B</b>	8	8	8	9	8	25	<b>II</b>
<b>C</b>	6	5	7	6	5	25	<b>III</b>
						10	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	23	21	24	24	21	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.43 Normalización de la tabla 3.42

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,30
<b>B</b>	0,35	0,38	0,33	0,38	0,38	0,25	<b>II</b>
<b>C</b>	0,26	0,24	0,29	0,24	0,24	0,25	<b>III</b>
						0,10	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, la alternativa A, correspondiente a la válvula de globo la cual permite estrangular el flujo adecuadamente para regular el caudal y obtener una presión adecuada.

Tabla 3.44 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,38
<b>B=</b>	0,36
<b>C=</b>	0,26

Fuente: Propia

#### 3.4.4.8 Control de caudal de salida de vapor

Es necesaria la regulación de la salida de vapor ya que el suministro adecuado depende de la aplicación que vaya a tener el vapor. Como el proyecto en general tiene fines didácticos, la aplicación del vapor no se determina en el mismo, sin embargo este control es necesario con el fin de que se pueda apreciar el trabajo

del caldero a diferentes regímenes de consumo de vapor. A continuación se presentan las siguientes alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.45 Alternativas y criterios de selección para el control de caudal de salida de vapor

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Válvula de globo	<b>I</b>	Facilidad para regular el caudal de salida de vapor
<b>B</b>	Válvula de mariposa	<b>II</b>	Inversión necesaria
<b>C</b>	Electroválvula	<b>III</b>	Fiabilidad de funcionamiento
		<b>IV</b>	Disponibilidad en el mercado
		<b>V</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.46 Asignación de valores y ponderación para la selección del control de caudal de salida de vapor

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	9	8	9	9	8	30
<b>B</b>	8	8	8	9	8	25	<b>II</b>
<b>C</b>	6	5	7	6	5	25	<b>III</b>
						10	<b>IV</b>
						10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	23	21	24	24	21	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.47 Normalización de la tabla 3.46

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	V	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,30
<b>B</b>	0,35	0,38	0,33	0,38	0,38	0,25	<b>II</b>
<b>C</b>	0,26	0,24	0,29	0,24	0,24	0,25	<b>III</b>
						0,10	<b>IV</b>
						0,10	<b>V</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, la alternativa A, correspondiente a la válvula de globo, la cual nos permitirá regular el caudal de salida de vapor en un amplio margen. De esta manera, la aplicación del caldero se vuelve flexible para diversas necesidades.

Tabla 3.48 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,38
<b>B=</b>	0,36
<b>C=</b>	0,26

Fuente: Propia

### 3.4.5 SISTEMA DE PURGA

El agua de alimentación que ingresa al caldero lleva consigo impurezas tales como sedimentos, incrustaciones y otras sustancias extrañas, inclusive si el agua cruda fuera tratada. El agua que se mantiene en fase líquida en la parte inferior del caldero, concentrará todas las sustancias extrañas que contenía el agua que

ha sido vaporizada (a excepción de las que han sido arrastradas con el vapor). Las impurezas se concentran, por lo tanto, cada vez más en el fondo y en las paredes del tanque si no se efectúa una desconcentración sistemática, denominada purga, vertiendo al drenaje una parte del agua del caldero.

Debido a que el proyecto en sí, se basa en el diseño de un caldero didáctico sencillo, se efectuará una selección entre dos sistemas de purga: manual (intermitente) y continua. La purga manual (intermitente) es necesaria para controlar puntualmente la concentración de sólidos en el agua del caldero. La purga continua implica una remoción continua de agua concentrada del caldero. A continuación se enuncian estas alternativas y sus criterios de selección:

Tabla 3.49 Alternativas y criterios de selección para el sistema de purga

Alternativas		Criterios de selección	
Código	Alternativa	Código	Criterio
<b>A</b>	Purga manual (intermitente)	<b>I</b>	Conveniencia para la aplicación
<b>B</b>	Purga continua	<b>II</b>	Inversión necesaria
		<b>III</b>	Facilidad de mantenimiento
		<b>IV</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.50 Asignación de valores y ponderación para la selección del sistema de purga

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	10	8	8	9	40
<b>B</b>	7	6	7	7	30	<b>II</b>
					15	<b>III</b>
					15	<b>IV</b>
<b>SUMATORIA</b>	17	14	15	16	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.51 Normalización de la tabla 3.50

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,59	0,57	0,53	0,56	0,40
<b>B</b>	0,41	0,43	0,47	0,44	0,30	<b>II</b>
					0,15	<b>III</b>
					0,15	<b>IV</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, la alternativa A, correspondiente al sistema de purga manual (intermitente). Este sistema se localizará en la parte inferior del caldero de tal manera que a más de bajar la concentración de los sólidos disueltos en el agua del caldero, también removerá una porción de sedimentos, los cuales se concentran en la parte inferior del mismo.

Tabla 3.52 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,57
<b>B=</b>	0,43

Fuente: Propia

### 3.4.5.1 Válvula para purga manual (intermitente)

El sistema de purga manual (intermitente), anteriormente seleccionado, debe ser controlado por una válvula que permita regular el flujo de líquido que se desea eliminar del interior del tanque, arrastrando consigo las impurezas acumuladas. A continuación se muestran las alternativas y criterios de selección:

Tabla 3.53 Alternativas y criterios de selección para la válvula para purga manual

<b>Alternativas</b>		<b>Criterios de selección</b>	
<b>Código</b>	<b>Alternativa</b>	<b>Código</b>	<b>Criterio</b>
<b>A</b>	Válvula de compuerta	<b>I</b>	Inversión necesaria
<b>B</b>	Válvula de globo	<b>II</b>	Fiabilidad de funcionamiento
<b>C</b>	Válvula de mariposa	<b>III</b>	Disponibilidad en el mercado
		<b>IV</b>	Factibilidad de realización

Fuente: Propia

Tabla 3.54 Asignación de valores y ponderación para la selección de la válvula para purga manual

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	9	8	9	9	40
<b>B</b>	8	8	9	9	25	<b>II</b>
<b>C</b>	7	8	8	9	25	<b>III</b>
					10	<b>IV</b>
<b>SUMATORIA</b>	24	24	26	27	100	

Fuente: Propia

Tabla 3.55 Normalización de la tabla 3.54

Criterios de selección Alternativas	I	II	III	IV	PONDERACIÓN	
	<b>A</b>	0,38	0,33	0,35	0,33	0,40
<b>B</b>	0,33	0,33	0,35	0,33	0,25	<b>II</b>
<b>C</b>	0,29	0,33	0,30	0,33	0,25	<b>III</b>
					0,10	<b>IV</b>
<b>SUMATORIA</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Propia

Se obtiene como mejor opción, la alternativa A, correspondiente a una válvula de compuerta. Dicha válvula es ideal para aplicaciones en las cuales solo interesa la apertura o cierre total de la misma.

Tabla 3.56 Resultados obtenidos

<b>A=</b>	0,36
<b>B=</b>	0,34
<b>C=</b>	0,30

Fuente: Propia

## **CAPÍTULO 4**

### **CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO**

#### **4.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA Y VAPOR**

##### **4.1.1 TANQUE CALDERO**

De acuerdo a la selección realizada se empleó un tanque de GLP de 15 kg de uso doméstico. Este envase está fabricado con lámina de acero de bajo carbono (ASTM A36) de 2,5 mm de espesor. La presión de prueba que puede resistir este tanque es de 7,37 MPa (75 kg/cm<sup>2</sup>, 1070 psi) según la norma NTE INEN 2143, la cual se debe cumplir en su proceso de fabricación. La máxima presión que este tanque estaría soportando en el proceso es 120 psi, por tanto este aspecto de resistencia a la presión se cumple satisfactoriamente.

La ventaja de este tanque es que el material con el cual está fabricado resulta fácilmente soldable para acoplar todos los aditamentos que se requieran. Además en la parte superior del mismo cuenta con un acople para la válvula de gas de 3/4" de diámetro, el cual servirá para colocar directamente la válvula de seguridad.

##### **4.1.1.1 Dimensiones**

Largo: 0,45 m

Diámetro: 0,33 m

Área exterior: 0,459 m<sup>2</sup>

Volumen real: 0,037 m<sup>3</sup>

Figura 4.1 Tanque de GLP de 15 kg



Fuente: Propia

#### 4.1.1.2 Procedimiento realizado para adecuación del tanque

- Vaciar en su totalidad el contenido de GLP.
- Retirar la válvula de salida de gas.

Figura 4.2 Válvula normalizada de tanques de GLP



Fuente: Propia

- Retirar la base inferior y soporte superior del cilindro de gas.
- Realizar la soldadura de placas de acero A36 (35 x 35 x 10 mm) perforadas y roscadas (rosca NPT 1/2") en los lugares respectivos donde se colocarán los neoplos para acoplar: los medidores de presión; las válvulas de entrada de agua, salida de vapor y de purga.

Figura 4.3 Placas soldadas en el tanque con neoplos



Fuente: Propia

- Soldar un perno M8 x 30 mm en la parte inferior del tanque para sujeción del mismo.

Figura 4.4 Perno soldado a la parte inferior del tanque



Fuente: Propia

- Construir una base simple de estructura metálica (de cuatro patas) con ángulos L de acero A36 (25 x 3 mm) para soporte del tanque.

Figura 4.5 Base de estructura metálica para el tanque



Fuente: Propia

- Ubicar el tanque sobre la base metálica y asegurar mediante una tuerca M8 colocada en el perno anteriormente soldado.

Figura 4.6 Tanque asentado sobre la base



Fuente: Propia

- Colocar los neplios galvanizados (1/2" x 50 mm) en los orificios roscados de las placas, para el posterior acople de válvulas y medidores.

Figura 4.7 Vista del tanque con acoples instalados



Fuente: Propia

#### **4.1.2 AISLANTE TÉRMICO PARA EL TANQUE**

De acuerdo con la selección realizada, se determinó que tanto un aislante de poliuretano como uno de lana de vidrio son adecuados para el proceso de aislamiento térmico. De esta manera se optó por utilizar dos capas de dichos materiales. El poliuretano se lo pudo obtener en forma de bloques, mientras la lana de vidrio se la encuentra disponible como planchas las cuales pueden estar recubiertas con papel aluminio.

##### **4.1.2.1 Procedimiento de colocación**

- Colocar inicialmente una capa de 1 cm de espesor de poliuretano adherida al tanque con pegamento.
- Cubrir esta capa de aislante con cinta adhesiva con el fin de compactar la capa y sujetarla convenientemente.

Figura 4.8 Tanque con la primera capa de aislante (poliuretano)



Fuente: Propia

- Añadir sobre la cinta pegada una capa de lana de vidrio de 1 cm de espesor, recubierta con papel aluminio, con la utilización de pegamento.

Figura 4.9 Ubicación de la capa de lana de vidrio



Fuente: Propia

## 4.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA

### 4.2.1 BOMBA PARA AGUA

#### 4.2.1.1 Bomba de engranajes externos

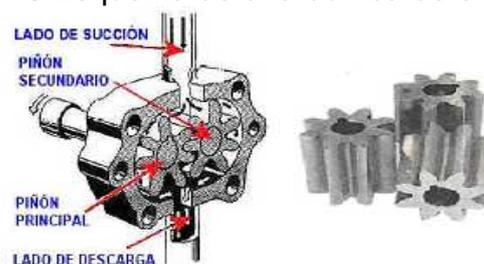
En el capítulo anterior, se realizó la selección de una bomba de engranajes, cuya presión de diseño debe ser ligeramente superior a la presión de accionamiento de la válvula de seguridad (120 psi). Esta bomba seleccionada tiene una presión nominal de hasta 250 psi, por tanto cumple con los requerimientos de presión de bombeo hacia el interior del tanque.

##### 4.2.1.1.1 Características

La bomba de engranajes es una bomba mecánica, volumétrica, de desplazamiento positivo, donde las cámaras de trabajo desplazan el líquido. La cavidad de aspiración tiene que estar herméticamente sellada y aislada de la descarga. Se admite la existencia de pequeñas filtraciones de líquido.

Son ampliamente utilizadas en máquinas térmicas, industria automotriz, agricultura, obras públicas y minería. Se aplican en lugares donde el nivel sonoro no es determinante, con ambientes muy contaminados y fluidos hidráulicos.

Figura 4.10 Esquema de una bomba de engranajes



Fuente: <http://www.quiminet.com>

#### 4.2.1.1.2 Ventajas

- Permiten obtener caudales en un amplio rango, desde 1 a 600 l/min.
- Su presión varía de 15 a 175 kg/cm<sup>2</sup> (presión de punta hasta 200 kg/cm<sup>2</sup>, 2845 psi).
- Su velocidad va de 500 a 4000 rpm.
- Tienen una construcción simple.
- Cojinetes externos que facilitan el mantenimiento.
- Trabajan con un motor eléctrico.
- Estas bombas pueden llegar a dar un 93% de rendimiento volumétrico.
- El tipo de bomba más utilizado es el de engranajes rectos.

Figura 4.11 Bomba de engranajes utilizada

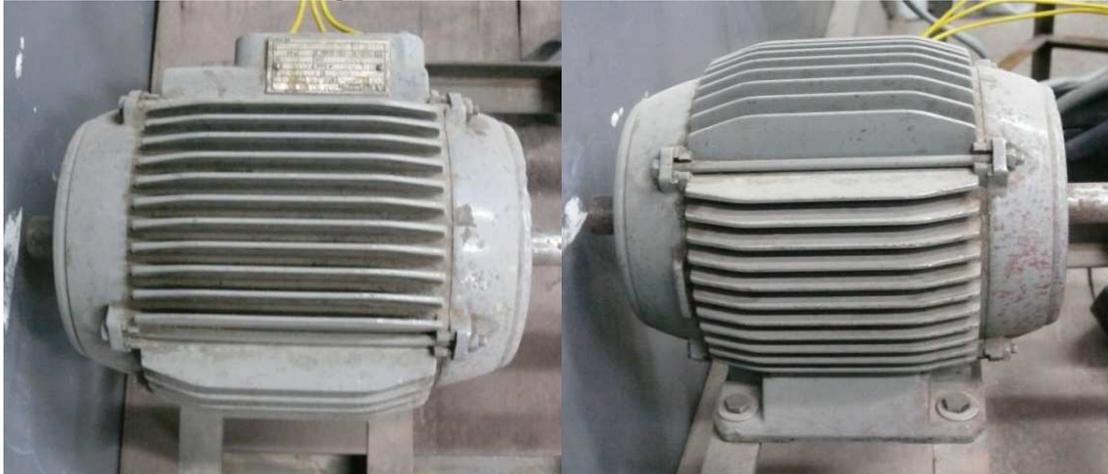


Fuente: Propia

#### 4.2.2 ACCIONAMIENTO DE LA BOMBA

De acuerdo con los cálculos realizados y las características de la bomba de engranajes, se seleccionó un motor eléctrico con una potencia de 1,5 HP; 3380 rpm; de conexión trifásica a 220 V de corriente alterna a 60 Hz.

Figura 4.12 Motor eléctrico utilizado



Fuente: Propia

Figura 4.13 Placa del motor eléctrico



Fuente: Propia

### 4.2.3 ACOPLA BOMBA - MOTOR

Se realizó el acople entre el eje motriz del motor eléctrico y el eje motriz de la bomba de engranajes mediante un bocín maquinado de acuerdo a los diámetros de cada eje, con dos orificios pasantes y roscados (rosca UNC 1/4") para alojamiento de dos prisioneros (1/4" x 5 mm) que garantizan el ajuste entre los ejes motrices de la bomba y del motor. Adicionalmente se construyó una estructura metálica simple con ángulos L de acero A36 (25 x 3 mm) para soporte tanto de la bomba como del motor.

Figura 4.14 Vista del acople entre el motor (izq.) y la bomba (der.)



Fuente: Propia

Figura 4.15 Estructura metálica bomba - motor

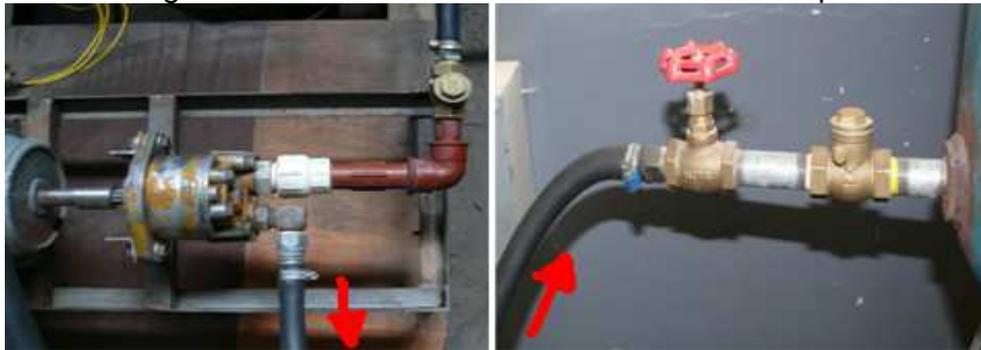


Fuente: Propia

#### 4.2.4 ACOPLA BOMBA – TANQUE

Para permitir la alimentación de agua hacia el caldero, se debe acoplar la salida de la bomba con la entrada de agua del tanque, regulada por una válvula, la cual será descrita posteriormente. Para esta acción se utilizó una manguera de caucho de 1/2" de diámetro y resistencia a la presión de hasta 200 psi, sujeta mediante abrazaderas en cada extremo. Cabe indicarse que la manguera se acopla a la válvula mediante un neplo para manguera de 1/2", y se utiliza el mismo acople para conectar a la salida de la bomba.

Figura 4.16 Salida de la bomba / entrada al tanque



Fuente: Propia

### 4.3 SISTEMA DE CALENTAMIENTO

#### 4.3.1 ELEMENTO CALEFACTOR

De acuerdo a la potencia eléctrica calculada 4,77 kW, se adquirió una resistencia eléctrica de marca CAMCO, que brinda una potencia nominal de 5,5 kW con una conexión de 240 voltios de corriente alterna, la cual debe ser conectada únicamente en presencia de agua. Esta resistencia es de tipo tubular y tiene un extremo roscado para su colocación en una placa de acero A36 (50 x 50 x 10 mm) perforada y roscada (rosca NPT 1/7/16") que debe ser soldada al tanque; cuenta también con un empaque que garantiza el sellado hermético de la misma. Se caracteriza por su alta densidad de potencia por unidad de área, es decir, mayor a 150 W por pulgada cuadrada.

Figura 4.17 Resistencia eléctrica CAMCO



Fuente: Propia

Figura 4.18 Resistencia instalada



Fuente: Propia

### 4.3.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Como ya se especificó anteriormente se utilizará energía proveniente de la red de suministro eléctrico de 220 V de corriente alterna. Para realizar la conexión se utiliza un cableado entre dos fases del tendido trifásico disponible en el Laboratorio de Automatización Industrial. Es necesario considerar el amperaje que circula por la resistencia para no sobrecargar el sistema; esta intensidad es de aproximadamente 25 A.

Figura 4.19 Tomacorriente trifásico para 220 V



Fuente: Propia

## 4.4 SISTEMA DE CONTROL

### 4.4.1 CONTROLADOR

El controlador, como ya se indicó anteriormente, es un PLC marca Allen–Bradley, modelo 1100, serie L16BBB.

La fuente de alimentación se trata de un transformador que convierte a la señal alterna de 110 V del suministro eléctrico en corriente continua que puede ser regulada mediante una resistencia variable desde un valor de 0 hasta 24 V. Se

debe colocar este voltaje en un valor de 24 V DC, tanto para el PLC como para los sensores.

#### 4.4.1.1 Especificaciones

Largo: 110 mm

Ancho: 90 mm

Altura: 87 mm

Número de E/S: 12 entradas (10 digitales y 2 analógicas) y 6 salidas

Voltaje de fuente de alimentación eléctrica: 24 V DC (-15%, +10%)

Corriente de entrada al momento de arranque de la fuente: 15 A durante 20 ms

Consumo de potencia: 35 W

Tipo de circuito de entrada: Relé / FET

Temperatura de funcionamiento: -20 °C a 65 °C

Temperatura de almacenamiento: -40 °C a 85 °C

Humedad relativa: 5 a 95%, sin condensación

Figura 4.20 PLC Allen – Bradley 1100



Fuente: <http://www.rockwellautomation.es>

#### **4.4.2 MEDIDOR DE PRESIÓN INTERNA DEL TANQUE**

Se optó por adquirir un presostato (pressure switch) con regulación de presión de conexión y desconexión, para un límite máximo de 220 psi. Este medidor para su acople tiene una rosca, la cual se coloca por medio de acoples de bronce en una placa de acero A36 (35 x 35 x 10 mm) perforada y roscada (rosca NPT 1/2”), ubicada en el sector donde se medirá la presión interna del tanque.

##### **4.4.2.1 Especificaciones**

Marca: Square D

Modelo: Pumptrol™

Clase: 9013

Rango de ajuste: 0 – 220 psi (1517 kPa)

Presión calibrada de conexión: 60 psi

Presión calibrada de desconexión: 80 psi

Conexión: Mediante rosca NPT 5/16”

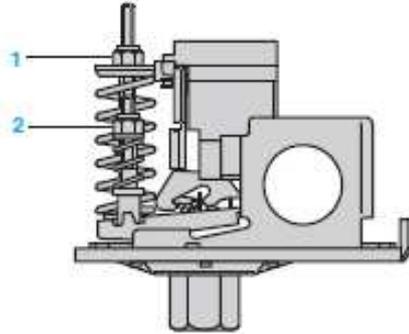
##### **4.4.2.2 Modo de ajuste**

La regulación de este medidor de presión, se efectúa por medio de dos resortes que mediante el ajuste de sus respectivas tuercas de 3/8” pueden cambiar su longitud para obtener los niveles de presión necesarios. El resorte de mayor diámetro es conocido como de rango, mientras el de menor diámetro es conocido como diferencial.

Resorte de rango: Se gira la tuerca en sentido horario para aumentar la presión de conexión o antihorario para disminuirla.

Resorte diferencial: Se gira la tuerca en sentido horario para aumentar la presión de desconexión o antihorario para disminuirla.

Figura 4.21 Resortes del presostato: (1) de rango y (2) diferencial



Fuente: SQUARE D; 9013 PUMPTROL® Commercial Pressure Switches Type F and 9013 Commercial Pressure Switches Type G Catalog

Figura 4.22 Presostato Square D



Fuente: <http://www.squared.com>

Figura 4.23 Presostato instalado



Fuente: Propia

#### 4.4.3 MANÓMETRO

Este medidor es un manómetro del tipo tubo de Bourdon y servirá para controlar visualmente la presión interna del tanque. Mide la presión en un rango de entre 0 a 200 psi. Se lo instalará al tanque junto con el presostato mediante acoples de bronce.

Figura 4.24 Manómetro



Fuente: [www.todoagua.aqua-soft.com.mx](http://www.todoagua.aqua-soft.com.mx)

Figura 4.25 Manómetro instalado junto al presostato



Fuente: Propia

#### 4.4.4 MEDIDOR DE NIVEL DE LÍQUIDO

De acuerdo a la selección realizada, se optó por un sensor de nivel tipo óptico. Este sensor se basa en el funcionamiento de un circuito electrónico detector de oscuridad, el cual activa un relé en ausencia de luz. La fuente luminosa será una luz láser, orientada todo el tiempo hacia el sensor y que atraviese un visor de nivel, la misma que será bloqueada en algún momento por un flotador, que se desplazará según el nivel de líquido en el interior del visor acoplado al tanque.

##### 4.4.4.1 Visor de nivel

Un medidor de nivel además de su función de control debe permitir una visualización real del nivel de líquido en todo momento. De esta manera, en caso de falla de la automatización, el personal a cargo del equipo estaría en posibilidad de percatarse a tiempo de una situación riesgosa. Por esta razón, siempre se observan visores de nivel en todo tipo de calderos.

Se ha decidido para este proyecto utilizar un visor de nivel conformado por un tubo de vidrio de alta resistencia a la presión (200 psi) de 15 mm de diámetro exterior; 1,5 mm de espesor y 28,5 cm de largo. Este tubo se lo ensambló al tanque mediante acoples tipo bocín (elaborados en nylon) unidos a codos y

uniones universales de bronce, las cuales se unen al tanque por medio de placas de acero A36 soldadas.

#### 4.4.4.1.1 Construcción y ensamblaje

- Soldar en dos placas de acero A36 (45 x 45 x 10 mm) perforadas, el complemento macho de dos uniones universales de bronce de 1/2" de diámetro.
- Soldar el acople anterior en los lugares seleccionados del tanque.

Figura 4.26 Acople soldado para el visor de nivel



Fuente: Propia

- Soldar cada complemento hembra de las uniones universales a dos codos de bronce

Figura 4.27 Codo de bronce soldado al complemento hembra de la unión universal



Fuente: Propia

- Maquinar dos acoples de nylon tipo bocín que ingresen en apriete dentro de los codos de bronce y permitan alojar al tubo de vidrio de forma hermética con la ayuda de empaques tipo anillo de caucho.

Figura 4.28 Acople de nylon tipo bocín



Fuente: Propia

- Introducir los acoples de nylon en los codos de bronce, sellados herméticamente con la ayuda de anillos de caucho.
- Cortar el tubo de vidrio en la longitud requerida e insertar cuidadosamente cada uno de los extremos del mismo dentro de los acoples de nylon (se debe ubicar antes el flotador en el interior del tubo).

Figura 4.29 Conjunto armado del visor de nivel



Fuente: Propia

- Situar el conjunto armado (codos – acoples – tubo) en las uniones universales y ajustar las respectivas tuercas con precaución.

Figura 4.30 Conjunto armado del visor de nivel colocado en el tanque



Fuente: Propia

#### 4.4.4.2 Flotador

Constituye una aplicación del principio de empuje del agua sobre los cuerpos, el cual enuncia que se genera una fuerza de empuje que es igual al peso del agua desplazada por el cuerpo que está en contacto con la misma. Es recomendable que el flotador tenga el menor peso posible para que de esta manera el empuje generado por el fluido permita que flote adecuadamente. Por esta razón es preferible la forma hueca y hermética para que no ingrese agua.

Para esta aplicación fue conveniente construir un flotador cilíndrico debido a que el diámetro interior del tubo de vidrio es de tan solo 12 mm. El material utilizado fue bronce en forma de lámina de 0,2 mm de espesor. Este flotador debe garantizar que no solo flote en agua en condiciones atmosféricas sino a las condiciones termodinámicas más extremas de la aplicación. Esto debido a que a alta presión y temperatura la densidad del agua se reduce considerablemente y afecta a la fuerza de empuje.

##### 4.4.4.2.1 Dimensiones

Largo: 25 mm

Diámetro: 10 mm

#### 4.4.4.2.2 Construcción

- Cortar la lámina de bronce con las medidas adecuadas para formar el cilindro (32 x 20 mm).

Figura 4.31 Lámina de bronce



Fuente: Propia

- Dar la forma cilíndrica con la ayuda de un eje de 10 mm de diámetro y realizar la soldadura con estaño de un cordón longitudinal que permita cerrar la lámina cilindrada.

Figura 4.32 Lámina de cobre colocada en el eje que le da la forma cilíndrica



Fuente: Propia

- Conformar por embutición dos tapas de forma semiesférica de 10 mm de diámetro que permitan cerrar los extremos del cilindro.

Figura 4.33 Proceso de embutición de las tapas del flotador



Fuente: Propia

- Soldar con estaño las tapas a los extremos del cilindro y verificar que el flotador no permita el ingreso de líquido, para que pueda operar en condiciones máximas de trabajo.

Figura 4.34 Vista del flotador dentro del tubo de vidrio

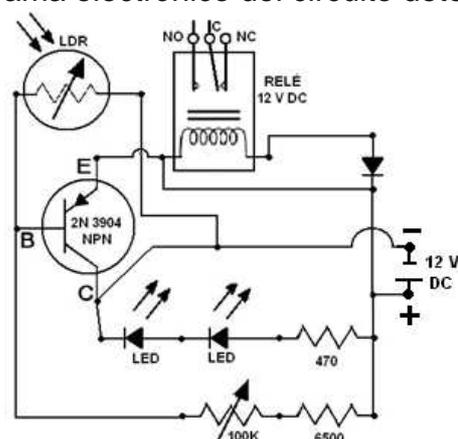


Fuente: Propia

#### 4.4.4.3 Circuito detector de oscuridad

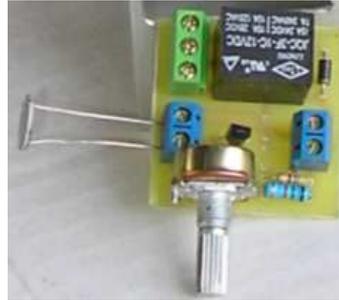
Este circuito, al detectar la ausencia de luz, amplificará la señal de voltaje mediante un transistor NPN, con lo cual se activará a la salida un relé de 12 V DC. Este relé permanecerá conectado mientras la fotorresistencia perciba la ausencia de luz. Incorpora un juego de dos resistencias fijas de  $470\ \Omega$  y  $6500\ \Omega$ , una resistencia regulable (potenciómetro), una resistencia variable con la luz (fotorresistencia), dos LEDs que se encienden indicando oscuridad, un diodo y bornes de conexión. El potenciómetro permite el ajuste de la sensibilidad en el circuito. La alimentación del circuito se da mediante una fuente de 12 V DC. A continuación se ilustra un diagrama de este circuito:

Figura 4.35 Diagrama electrónico del circuito detector de oscuridad



Fuente: Propia

Figura 4.36 Circuito detector de oscuridad armado

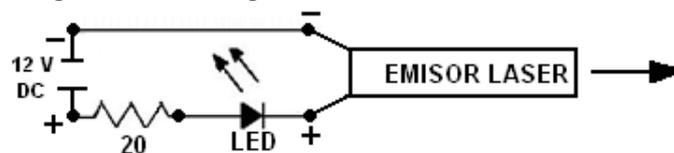


Fuente: Propia

#### 4.4.4.3.1 Circuito de luz láser

Para facilitar la generación de la luz láser necesaria para el funcionamiento del circuito descrito anteriormente se adaptó un apuntador láser. Este elemento se lo encuentra fácilmente en el mercado y es de bajo costo. El voltaje con el que se alimentará será el mismo del circuito detector de oscuridad (12 V), sin embargo el puntero funciona con 4,5 V; por lo cual hay que reducir el voltaje. Para este efecto se utilizó un pequeño circuito reductor que se detalla a continuación:

Figura 4.37 Diagrama del circuito de luz láser



Fuente: Propia

Figura 4.38 Circuito de luz láser armado



Fuente: Propia

#### 4.4.4.3.2 Ensamblaje

- Armar tres circuitos detectores de oscuridad según los diagramas indicados anteriormente.
- Armar tres circuitos de luz láser como complemento de los circuitos del paso anterior.
- Colocar verticalmente los circuitos detectores de oscuridad en una caja adecuada que sitúe a la fotorresistencia en oscuridad pero permita el paso de luz láser por un agujero. La posición de los circuitos deberá estar de acuerdo a los niveles de líquido establecidos.

Figura 4.39 Caja de los circuitos detectores de oscuridad



Fuente: Propia

- Colocar verticalmente los circuitos de luz láser en un soporte adecuado que permita la emisión de luz láser. La posición de los circuitos deberá estar relacionada con las posiciones de los detectores de oscuridad.

Figura 4.40 Caja de los circuitos de luz láser



Fuente: Propia

- Ubicar la caja de los circuitos detectores de oscuridad, junto al visor de nivel, con la ayuda de dos pernos M6 x 50 mm soldados al tanque convenientemente.
- Ubicar la caja de los circuitos de luz láser, junto al visor de nivel, en el lado opuesto al de la caja anterior, con la ayuda de dos pernos M6 x 50 mm soldados al tanque en concordancia con los circuitos detectores de oscuridad.

Figura 4.41 Ubicación de los circuitos detectores de oscuridad y de luz láser



Fuente: Propia

- Realizar el respectivo cableado a las fuentes de alimentación.

#### **4.4.5 ACTUADOR PARA EL MOTOR ELÉCTRICO**

Se trata de un relé cuyo voltaje de activación debe ser de 24 V DC, ya que ese es el voltaje que le proporciona el PLC una vez que le envía la señal de actuación. En pruebas realizadas en este motor se midió el amperaje que circula por el circuito de potencia, el cual es de 3.5 A. Por lo tanto, este relé debe tener en su especificación un amperaje mayor a este valor. De esta manera se adquirió un relé de 24 V y 20 A, común en el mercado.

Figura 4.42 Relés de 24 V DC



Fuente: <http://yosedleonardo.blogspot.com>

#### 4.4.6 ACTUADOR PARA LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

Consiste en un relé cuyo voltaje de activación debe ser de 24 V DC, ya que ese es el voltaje que le proporciona el PLC una vez que le envía la señal de actuación. Dado que la resistencia posee una potencia de 5500 W y conocido el voltaje de la resistencia (220 V AC) se determina que la intensidad de corriente es de aproximadamente 25 A. Entonces, este relé debe tener en su especificación un amperaje mayor a este valor que es el del circuito de potencia. De esta manera se adquirió un relé de 24 V y 50 A, existente en el mercado.

Figura 4.43 Relé de 24 V DC y 50 A utilizado



Fuente: Propia

#### 4.4.7 ACTUADOR DE SOBREPRESIÓN (VÁLVULA DE SEGURIDAD)

Se utilizó una válvula de alivio de presión (de seguridad) de accionamiento mecánico, calibrable mediante un resorte. Este dispositivo se lo colocó en el lugar

donde normalmente está colocada la válvula de salida de GLP, ya que la rosca es la misma. Para la regulación se optó por calibrar a una presión de accionamiento de 120 psi, ya que la presión máxima de servicio será de 80 psi. Esta regulación de la presión de seguridad garantizará que el equipo no sufra daño en caso de que los controles restantes fallen por cualquier motivo, además dará seguridad a las personas cercanas al equipo.

#### 4.4.7.1 Especificaciones

Marca: Watts Regulator

Modelo: 530C

Rango de ajuste: 50 – 175 psi (5,17 – 12,06 bar)

Presión mínima de regulación: 25 – 30 psi (1,75 – 2,1 bar) por encima de la presión principal de servicio máxima

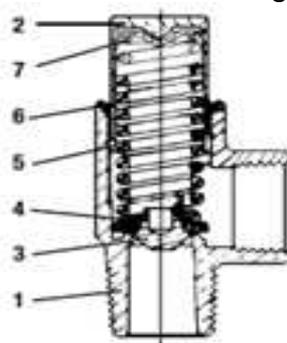
Conexión: Mediante rosca NPT 3/4"

Figura 4.44 Válvula de seguridad Watts



Fuente: <http://www.watts.com>

Figura 4.45 Partes de una válvula de seguridad



- 1) Cuerpo
- 2) Émbolo
- 3) Sujeción de Disco
- 4) Disco
- 5) Resorte Ajustable
- 6) Anillo
- 7) Arandela

Fuente: <http://www.watts.com>

Figura 4.46 Válvula de seguridad instalada



Fuente: Propia

#### 4.4.8 CONTROL DE CAUDAL DE ENTRADA DE AGUA

##### 4.4.8.1 Válvula de Globo

Se utilizó una válvula de globo de marca Kitz (1/2", 150 psi) de vueltas múltiples. En esta válvula el cierre se logra por medio de un disco o tapón que corta el paso del fluido en un asiento paralelo con la circulación en la tubería.

Esta válvula previamente se encuentra conectada, por medio de un neplo galvanizado (1/2" x 50 mm), con una válvula check de marca MBK (1/2", 200 psi) para garantizar que el flujo de agua sea en un solo sentido, evitar fugas de vapor y pérdidas considerables de presión. Todo este acople antes realizado, se coloca en el tanque mediante un neplo, igual al anterior, que esta situado en una placa de acero A36 perforada y roscada, que se encuentra soldada en la parte inferior del tanque caldero.

Figura 4.47 Válvula de entrada de agua montada y con válvula check

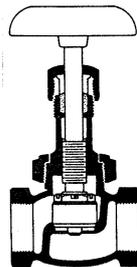


Fuente: Propia

#### 4.4.8.1.1 Características generales

- Recomendada para
  - Estrangulación o regulación de circulación.
  - Para accionamiento frecuente.
  - Para corte positivo de gases o aire.
  - Cuando es aceptable cierta resistencia a la circulación.
  
- Aplicaciones
  - Servicio general
  - Líquidos
  - Vapores
  - Gases
  - Pastas semilíquidas
  
- Ventajas
  - Estrangulación eficiente con estiramiento o erosión mínimos del disco o asiento.
  - Carrera corta del disco y pocas vueltas para accionarlas, lo cual reduce el tiempo y desgaste en el vástago y el bonete.
  - Control preciso de la circulación.
  
- Desventajas
  - Gran caída de presión.
  - Costo relativo elevado.

Figura 4.48 Esquema de una válvula de globo



Fuente: <http://www.monografias.com>

Figura 4.49 Válvula de globo en la entrada de agua



Fuente: Propia

#### **4.4.9 CONTROL DE CAUDAL DE SALIDA DE VAPOR**

Al igual que en el caso anterior, se utilizó una válvula de globo de marca Kitz (1/2", 150 psi) de vueltas múltiples. Dicha válvula está conectada a un neplo colocado en una placa de acero A36 perforada y roscada, soldada en la parte superior del tanque.

Figura 4.50 Válvula de salida de vapor instalada



Fuente: Propia

### **4.5 SISTEMA DE PURGA**

#### **4.5.1 VÁLVULA DE COMPUERTA**

Se trata de una válvula de marca Crane, especificada para presiones de hasta 9 bar (1/2", 130 psi) y temperaturas de hasta 180 °C. Dicha válvula está conectada

a un neplo galvanizado (1/2" x 50 mm) colocado en una placa metálica de acero A36 perforada y roscada, soldada en la parte inferior del tanque caldero.

#### 4.5.1.1 Características generales

- Recomendada para
  - Servicio con apertura total o cierre total, sin estrangulación.
  - Para uso poco frecuente.
  - Para resistencia mínima a la circulación.
  
- Aplicaciones:
  - Servicio general, aceites y petróleo, gas, aire, pastas semilíquidas, líquidos espesos, vapor, gases y líquidos no condensables, líquidos corrosivos.
  
- Ventajas
  - Alta capacidad.
  - Cierre hermético.
  - Bajo costo.
  - Diseño y funcionamiento sencillos.
  - Poca resistencia a la circulación.
  
- Desventajas
  - Control deficiente de la circulación.
  - Se requiere mucha fuerza para accionarla.
  - Debe estar cubierta o cerrada por completo.
  - La posición para estrangulación producirá erosión del asiento y del disco.
  
- Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento
  - Lubricar a intervalos periódicos.
  - Corregir de inmediato las fugas por la empaquetadura.
  - No cerrar nunca las llaves a la fuerza con la llave o una palanca.
  - Abrir las válvulas con lentitud para evitar el choque hidráulico en la tubería.

- Cerrar las válvulas con lentitud para ayudar a descargar los sedimentos atrapados.

Figura 4.51 Válvula de compuerta

Fuente: <http://www.electroplaneta.com>

Figura 4.52 Esquema de una válvula de compuerta

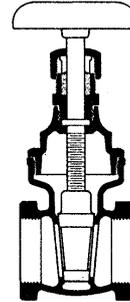
Fuente: <http://www.monografias.com>

Figura 4.53 Válvula para purga instalada



Fuente: Propia

## **CAPÍTULO 5**

### **PROGRAMACIÓN DEL PLC**

#### **5.1 ENTORNO DE PROGRAMACIÓN**

La programación del PLC se efectuó mediante el software LogixPro Simulator, aplicación informática de la línea de Controladores Programables MicroLogix de la marca Allen Bradley, desarrollado por The Learning Pit. Con esta aplicación es factible la realización del programa en el lenguaje Ladder o Escalera, también conocido como diagrama de contactos. Otro aspecto importante del software es su carácter didáctico y de fácil comprensión para el estudiante o programador que incursiona en el campo de los PLC y la Automatización Industrial.

El entorno de este programa cuenta con una ventana principal en la cual se halla el espacio de trabajo donde se colocan los segmentos de programación. En este espacio se deben ubicar los diferentes elementos como son: contactores, bobinas, funciones lógicas, comparadores, ramales en paralelo, etc. Todas estas partes se hallan en la ventana de herramientas, clasificadas por categorías: User, Bit, Timer / Counter, Input / Output, entre otras.

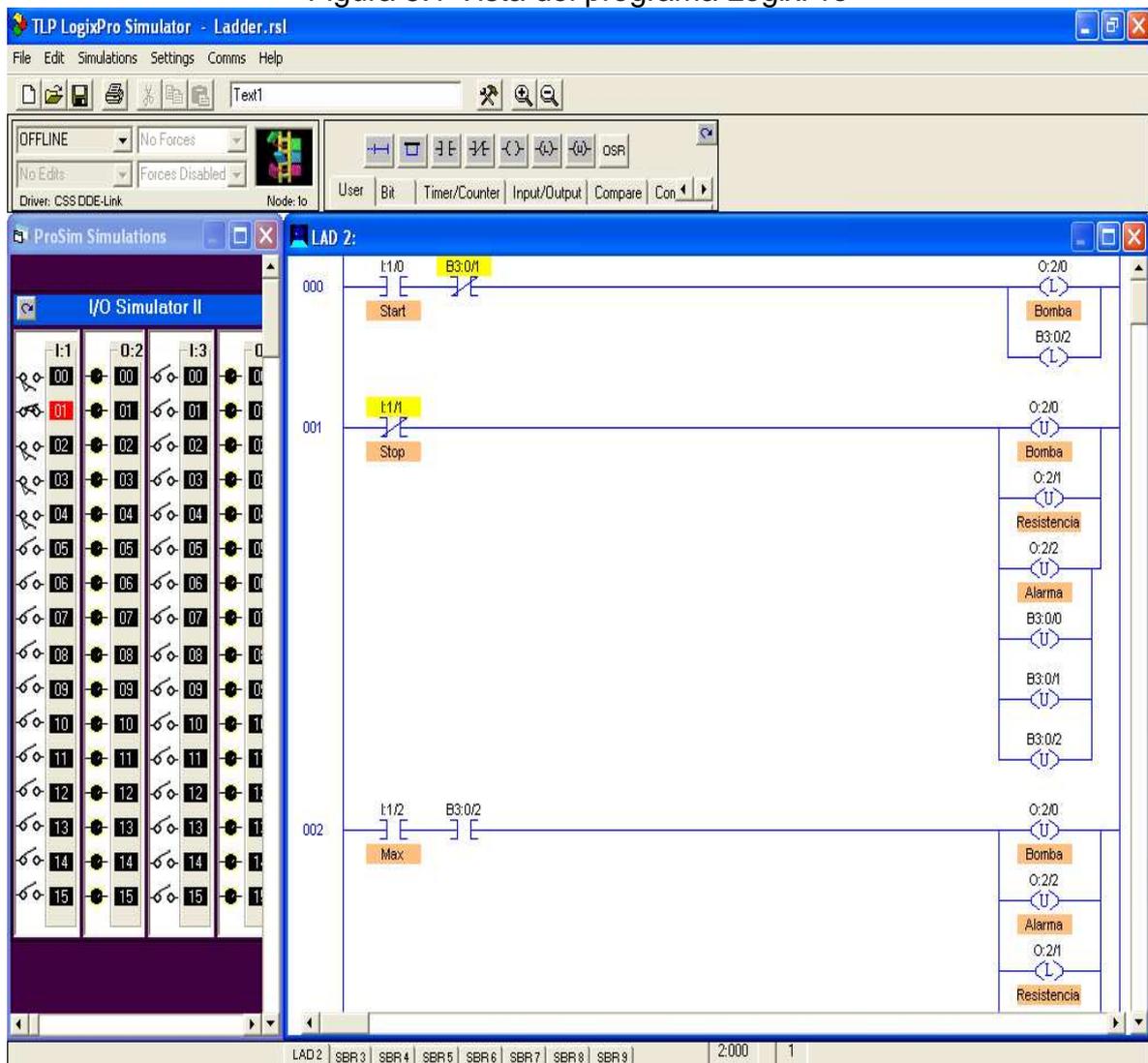
Una vez escrita la programación el programa da la opción de recurrir a una ventana de simuladores. Esto es posible dando clic en el menú Simulations. Aquí existen varios tipos de simuladores como I/O Simulator, Door Simulator, Silo Simulator, Batch Simulator y otros más. El más útil es el I/O Simulator o Simulador de Entradas y Salidas. En este simulador las entradas se representan como contactos definidos por el usuario y las salidas como focos luminosos. La definición de contactos puede ser como normalmente abierto, normalmente cerrado, pulsador fijo, pulsador con retorno, etc.

En caso de que se presenten dificultades en el proceso, existe un segmento de ayuda, suministrado por el programa, que explica ciertos conceptos básicos de

programación y otros detalles de la aplicación. Además brinda algunos ejemplos básicos para que el estudiante comprenda de una manera más adecuada. Esto es de vital importancia si es que no se ha manejado con anterioridad el programa.

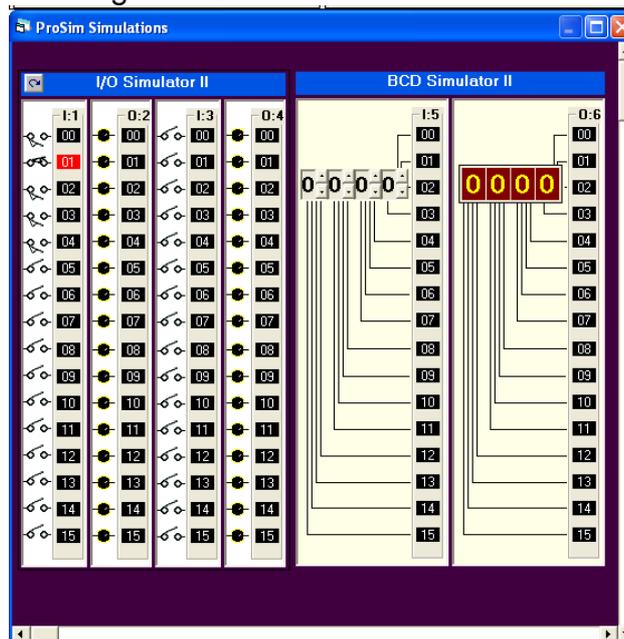
Finalmente, una vez que se haya concluido la programación y realizado la respectiva simulación se procede a pasar el programa a la memoria del PLC. Igualmente, el software de LogixPro permite este propósito conectando la computadora con el puerto de comunicación del controlador. Sin duda, es mejor para el usuario programar con este software que directamente al controlador.

Figura 5.1 Vista del programa LogixPro



Fuente: Propia

Figura 5.2 Ventana de simulación



Fuente: Propia

## 5.2 ELEMENTOS DE LA PROGRAMACIÓN

### 5.2.1 ENTRADAS

Permiten analizar las variables o señales que ingresan al sistema de control, es decir, aquellas que son procesadas por el controlador (PLC). Para el presente caso de control interesa conocer como varía el nivel de líquido en el tanque y la presión interna del mismo. Adicionalmente, se deben colocar dos pulsadores adicionales, uno de los cuales prenderá el equipo y arrancará el ciclo, mientras el otro lo apagará totalmente.

En cuanto a los sensores de nivel se emplearon los circuitos detectores de oscuridad, descritos anteriormente. Estos activan relés de 12 V, de los cuales se conectará al PLC el contacto normalmente abierto y el común. De esta manera constituyen sensores digitales, ya que están en posición abierta (0) o en posición cerrada (1). Estos sensores se los ha utilizado en los tres niveles de líquido predefinidos: máximo, mínimo y crítico.

La presión interna del tanque es otra variable controlable por el sistema. Para este efecto se encuentra instalado el presostato. Como ya se explicó éste consta de un contacto cerrado que se abre al detectar una presión máxima calibrada y se vuelve a cerrar en el momento en que la presión se reduce a otro valor susceptible de calibración. Es decir, también actúa como un sensor digital: (0) abierto y (1) cerrado. Si bien, únicamente constituye un sensor, físicamente se lo ha adaptado como dos sensores, uno de alta presión y otro de baja presión.

De esta manera, se tendrían en total 6 entradas que se describen a continuación:

Tabla 5.1 Descripción de las entradas

<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>	<b>Posición</b>	<b>Elemento</b>	<b>Denominación en la programación</b>
Encendido	Digital	Normalmente abierto	Pulsador	I:1/0
Apagado	Digital	Normalmente cerrado	Pulsador	I:1/1
Nivel máximo	Digital	Normalmente abierto	Relé 12 V	I:1/2
Nivel mínimo	Digital	Normalmente abierto	Relé 12 V	I:1/3
Nivel crítico	Digital	Normalmente abierto	Relé 12 V	I:1/4
Presión máxima	Digital	Normalmente cerrado	Presostato	I:1/5
Presión mínima	Digital	Normalmente cerrado	Presostato	I:1/6

Fuente: Propia

## 5.2.2 SALIDAS

Son las respuestas que envía el controlador (en este caso el PLC) después de procesar la información recibida y ejecutar lo que le dicta la programación respectiva. Estas respuestas se plasman como acciones mecánicas o eléctricas, por ejemplo, prender una luz, girar un motor, accionar un cilindro hidráulico, etc. Para el control que se está realizando interesa que se puedan activar tres salidas:

el motor eléctrico de la bomba hidráulica, la resistencia eléctrica de calentamiento y una alarma de emergencia. Los dos primeros elementos serán los que determinen el comportamiento del caldero (nivel de líquido, presión, temperatura), mientras el tercero es un complemento de seguridad y alerta en caso de que el nivel se reduzca por debajo del crítico.

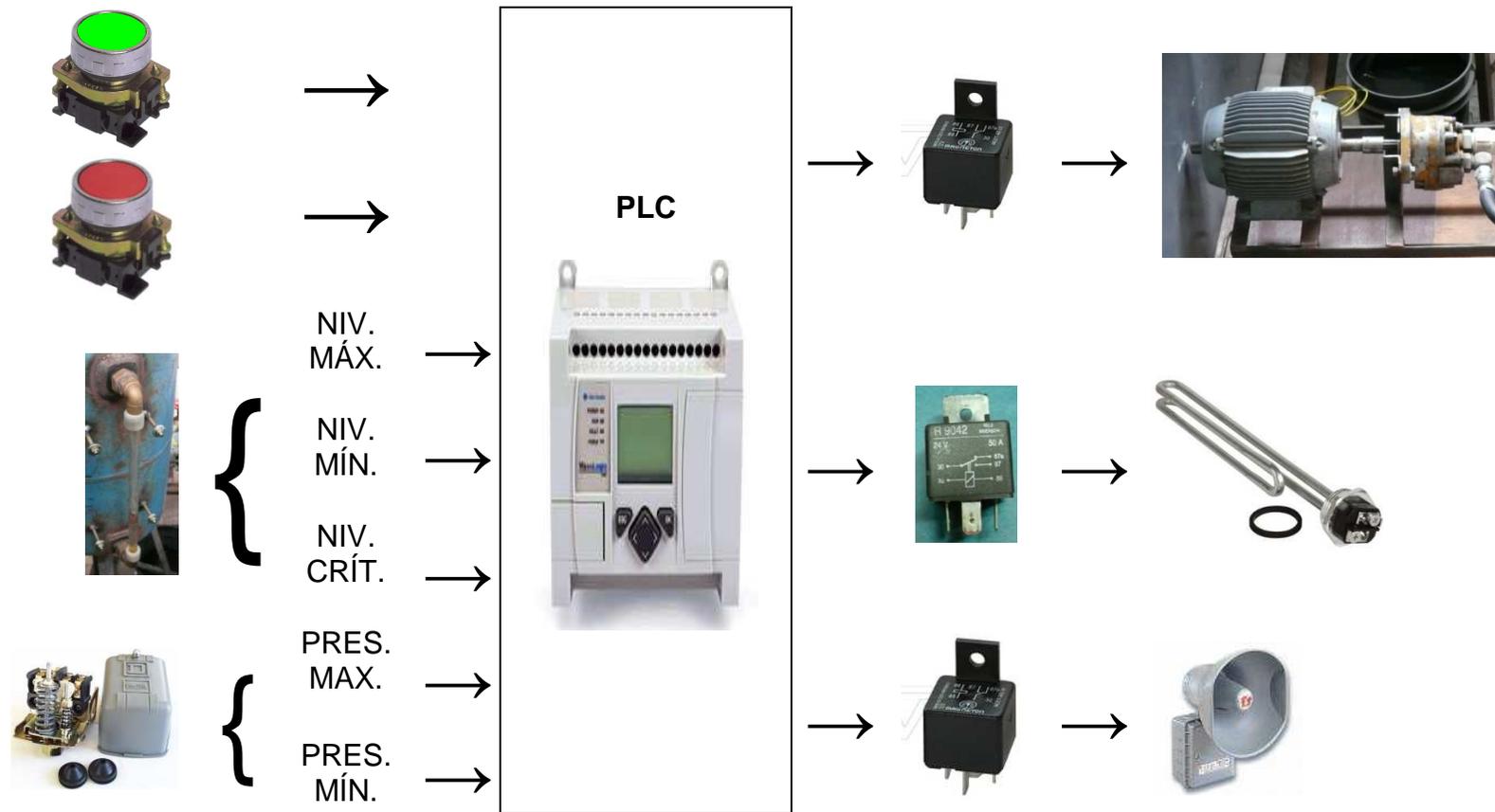
Tabla 5.2 Descripción de las salidas

<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>	<b>Actúa sobre</b>	<b>Accionador</b>	<b>Denominación en la programación</b>
Bomba	Digital	Motor de bomba hidráulica	Relé 24 V 20 A	O:2/0
Alarma	Digital	Alarma emergencia	Relé 24 V 20 A	O:2/1
Resistencia	Digital	Resistencia calentamiento	Relé 24 V 50 A	O:2/2

Fuente: Propia

### 5.3 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

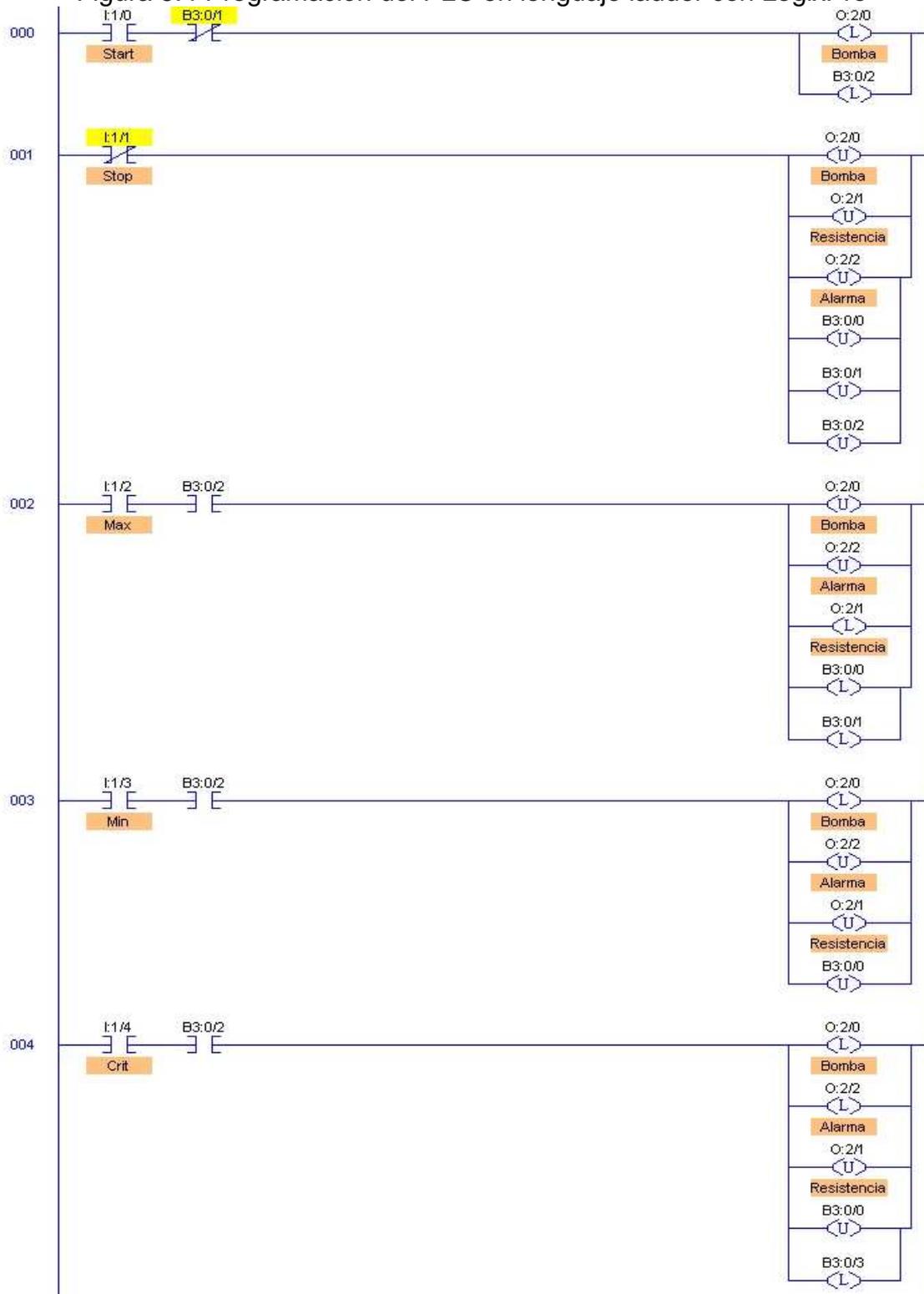
Figura 5.3 Diagrama del sistema de control

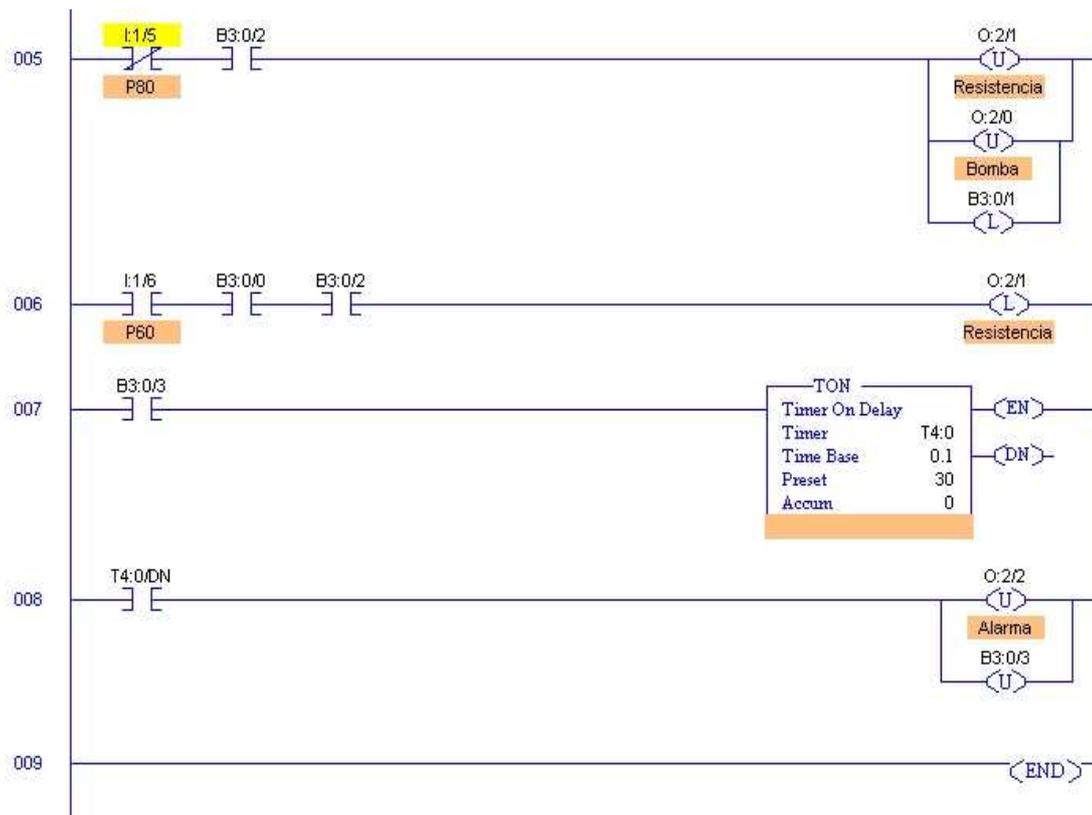


Fuente: Propia

## 5.4 PROGRAMACIÓN LADDER DEL PLC EN EL PROGRAMA LogixPro

Figura 5.4 Programación del PLC en lenguaje ladder con LogixPro





Fuente: Software LogixPro

#### 5.4.1 LECTURA DE LA PROGRAMACIÓN

- **Segmento 000**→ El pulsador N/A de Encendido (Start) I:1/0 activa (set / latch) la Bomba O:2/0 y pone en 1 (set) la memoria B3:0/2; siempre y cuando la memoria B3:0/1 se encuentre en 0 (reset).
- **Segmento 001**→ El pulsador N/C de Apagado (Stop) I:1/1 desactiva (reset / unlatch) todos los actuadores: Bomba O:2/0, Resistencia O:2/1 y Alarma O:2/2, además pone en 0 (reset) las memorias B3:0/0, B3:0/1 y B3:0/2.
- **Segmento 002**→ El sensor N/A de nivel máximo (Max) I:1/2 desactiva (reset) Bomba O:2/0 y Alarma O:2/2, mientras activa (set) la Resistencia O:2/1 y pone en 1 (set) las memorias B3:0/0 y B3:0/1; siempre y cuando la memoria B3:0/2 se encuentre en 1 (set).
- **Segmento 003**→ El sensor N/A de nivel mínimo (Min) I:1/3 desactiva (reset) Resistencia O:2/1 y Alarma O:2/2, mientras activa (set) la Bomba

- O:2/0 y pone en 0 (reset) la memoria B3:0/0; siempre y cuando la memoria B3:0/2 se encuentre en 1 (set).
- **Segmento 004**→ El sensor N/A de nivel crítico (Crit) I:1/4 desactiva (reset) la Resistencia O:2/1 mientras activa (set) Bomba O:2/0 y Alarma O:2/2, pone en 0 (reset) la memoria B3:0/0 y en 1 (set) la memoria B3:0/3; siempre y cuando la memoria B3:0/2 se encuentre en 1 (set).
  - **Segmento 005**→ El sensor N/C de presión máxima (P80) I:1/5 desactiva (reset) Resistencia O:2/1 y Bomba O:2/0, además pone en 1 (set) la memoria B3:0/1; siempre y cuando la memoria B3:0/2 se encuentre en 1 (set).
  - **Segmento 006**→ El sensor N/C de presión mínima (P60) I:1/6 activa (set) la Resistencia O:2/1 al momento de cerrarse, siempre y cuando las memorias B3:0/0 y B3:0/2 estén en 1 (set).
  - **Segmento 007**→ La memoria B3:0/3 activa el temporizador en retraso (timer on – delay / TON) T4:0 que actuará en un tiempo de 30 unidades de 0.1 segundos, es decir, 3 segundos.
  - **Segmento 008**→ El temporizador en retraso T4:0 desactiva (reset) la Alarma O:2/2 y pone en 0 (reset) la memoria B3:0/3.
  - **Segmento 009**→ Fin del programa.

#### 5.4.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

- El pulsador de Encendido es normalmente abierto puesto que por convención en el momento de aplastar este botón se cierra temporalmente dejando enclavados (activos) la bomba y una memoria B3:0/2.
- La memoria B3:0/2, activada por el Encendido (pasa de un valor 0 a 1), se la incorporó con el fin de que los sensores se activen y efectúen sus acciones respectivas únicamente después de aplastar el botón de Encendido. Esta acción es importante puesto que si el PLC está encendido y por algún motivo se activa un sensor comenzaría un ciclo sin que se haya aplastado el botón de inicio. Esto se logra colocando esta memoria en serie con los sensores.

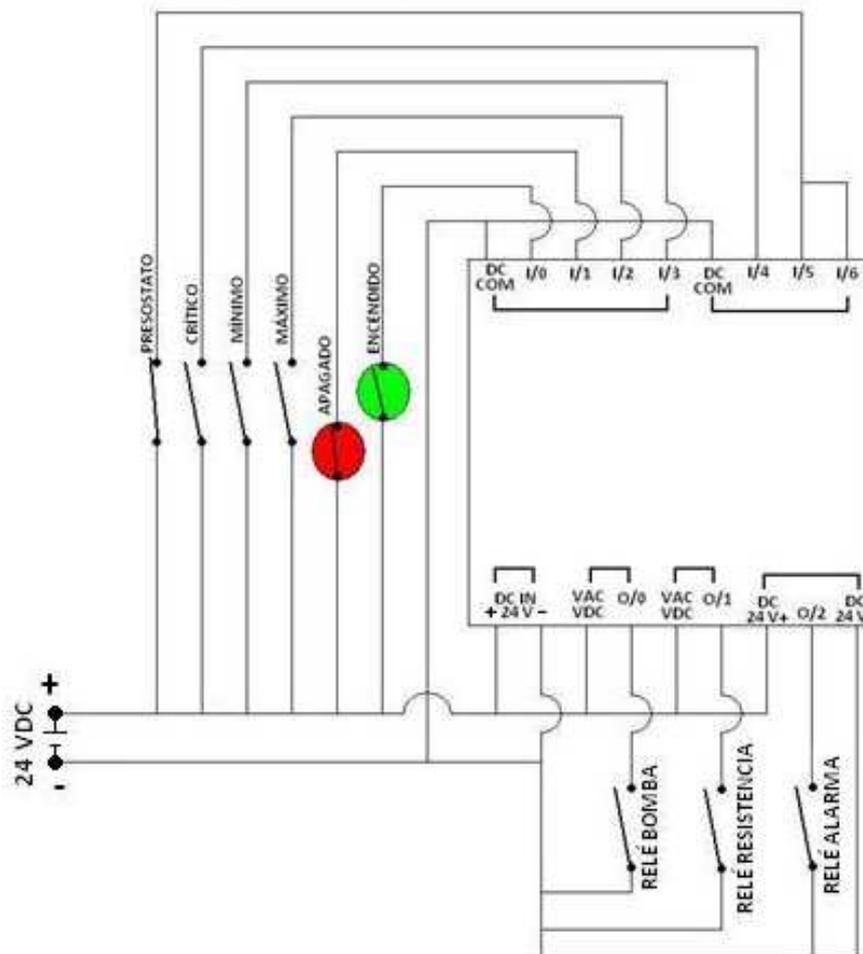
- El botón de Apagado es normalmente cerrado por convención, ya que al ser pulsado se abre temporalmente dejando desconectados todos los actuadores y todas las memorias.
- El sensor de Nivel Máximo, normalmente abierto, deja enclavada (encendida) la Resistencia calefactora y apagada la Bomba y la Alarma. Así mismo coloca las memorias B3:0/0 y B3:0/1 en 1, es decir las deja enclavadas.
- El sensor de Nivel Mínimo, normalmente abierto, deja enclavada (encendida) la Bomba, y apagada la Resistencia y la Alarma. La memoria B3:0/0 se queda apagada (puesta en 0).
- El sensor de Nivel Crítico, normalmente abierto, deja enclavada (encendida) la Bomba y la Alarma, y apagada la Resistencia. La memoria B3:0/0 se queda apagada (puesta en 0) y al mismo tiempo enciende (pone en 1) la memoria B3:0/3 que servirá para encender el temporizador.
- La memoria B3:0/0 sirve para que el presostato solo accione la resistencia cuando se vuelva a cerrar el contacto (después de subir a la máxima presión y bajar) y no al comenzar el ciclo, ya que si no estuviera esta memoria se enciende la resistencia al aplastar el encendido y quema la misma si no hay agua en el tanque.
- La memoria B3:0/1 sirve para dejar inactivo el botón de Encendido hasta que se aplaste el botón de Apagado. Esto permite que, si se presiona sucesivamente el botón de Encendido, solo tenga efecto en una ocasión y las siguientes no sucederá ninguna acción.
- El sensor de presión máxima, normalmente cerrado, apaga la Resistencia y la Bomba, y deja enclavada (encendida ó en 1) la memoria B3:0/1. Esto sucede siempre y cuando la memoria B3:0/2 (activada por el Encendido) se encuentra encendida, por esto se la colocó en serie.
- El sensor de presión mínima, normalmente cerrado, enciende la Resistencia. Esto sucede siempre y cuando las memorias B3:0/0 y B3:0/2 se encuentren encendidas, ya que se hallan en serie con la entrada descrita.
- La memoria B3:0/3 al ser activada (set) define un temporizador en retraso (timer on – delay) el cual responde a la nomenclatura T4:0. Este

temporizador tiene un tiempo base (time base) de 0.1 segundos y un tiempo de acción (preset) definido en 30, es decir correspondiente a 3 segundos. La variable accum muestra el tiempo acumulado en pantalla durante el ciclo.

- El efecto del temporizador se ve reflejado mediante la entrada T4:0/DN la cual apaga (reset) la Alarma y la memoria B3:0/3. Esto se ha hecho con el fin de que la alarma suene durante un corto tiempo debido al alto nivel de ruido que puede causar en el ambiente de trabajo.

## 5.5 DIAGRAMA DE CONEXIÓN

Figura 5.5 Esquema de conexiones



Fuente: Propia

## **CAPÍTULO 6**

### **PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **6.1 PRUEBAS REALIZADAS**

##### **6.1.1 PRUEBA DE BOMBEO**

- Verificar el giro del motor en el sentido de accionamiento de la bomba.
- Verificar las conexiones hidráulicas.
- Accionar el motor y constatar que la bomba entregue un caudal constante.
- Obstruir la salida de la bomba y colocar un manómetro con el fin de medir la presión máxima que puede dar el sistema de bombeo (200 psi).

##### **6.1.2 PRUEBA HIDROSTÁTICA**

- Una vez soldado el tanque caldero y acoplados sus componentes, cerrar todas las válvulas excepto la de entrada de agua.
- En esta única válvula abierta acoplar la salida de la bomba y comenzar a bombear agua.
- Observar si la presión aumenta o si existe la presencia de fugas de agua en el tanque (la presión de prueba fue de 200 psi).
- Corregir las posibles fugas en caso de que existan.

##### **6.1.3 PRUEBA DE RESISTENCIA DEL TUBO DE VIDRIO**

- Instalar el visor de nivel manipulando con precaución el tubo de vidrio.
- Bombear agua hasta que alcance un nivel adecuado (entre máx. y mín.).

- Cerrar todas las válvulas del caldero.
- Conectar la resistencia eléctrica de calentamiento.
- Dejar que la presión del líquido sobrepase la máxima de trabajo e inclusive la de seguridad (se llegó hasta una presión de prueba de 150 psi).
- Tomar las medidas de precaución y usar equipo de protección personal.

#### **6.1.4 PRUEBA DE CALENTAMIENTO**

- Se lleva a cabo paralelamente a la prueba de resistencia del tubo de vidrio.
- Constatar que la resistencia eléctrica de calentamiento logre la ebullición de la masa de agua interna y posteriormente eleve la presión durante la generación de vapor hasta el valor requerido (80 psi).
- Realizar mediciones eléctricas en la resistencia antes, durante y después del calentamiento.

#### **6.1.5 PRUEBA DE SENSORES**

##### **6.1.5.1 Sensores de presión**

- Verificar el funcionamiento del manómetro.
- Calibrar la presión de conexión y desconexión del presostato.
- Comprobar que el presostato se conecte y desconecte en las presiones establecidas durante el funcionamiento del equipo.

##### **6.1.5.2 Sensores de nivel**

- Constatar visualmente que el flotador de nivel se desplace adecuadamente a través del visor durante el funcionamiento del equipo.

- Verificar el funcionamiento constante de los circuitos de luz láser y detector de oscuridad.
- Comprobar la alineación de la luz láser a la fotorresistencia del circuito detector de oscuridad.

#### **6.1.6 PRUEBA DEL CONTROL Y PLC**

- Conectar la fuente al PLC, verificar que esté correctamente programado y en funcionamiento.
- Simular el sistema de control en la computadora.
- Realizar las conexiones de las entradas de manera que se observe si las salidas responden de la manera esperada.
- Realizar el conexionado completo y ejecutar el ciclo de control.
- Corregir posibles errores del controlador.

### **6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Si bien, el cálculo teórico constituye una aproximación simplificada de los resultados que se obtendrían en el desempeño real del equipo, siempre se presenta una variación apreciable. Esto sucede en virtud de que los procesos reales presentan mecanismos físicos que muchas veces no son considerados debido a su escasa influencia en materia energética. Por esta razón, es importante comparar e interpretar los resultados obtenidos con los resultados teóricos. A continuación se presenta una tabla comparativa que ilustra lo mencionado:

Tabla 6.1 Comparación de los resultados teóricos y reales

<b>Caso</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Potencia para la Resistencia (kW)</b>
Teórico sin aislante	50*	5,01
Teórico con aislante	50*	4,77
Real sin aislante	75	5,5**
Real con aislante	56	5,5**

Fuente: Propia

\*Tiempo planteado para el cálculo

\*\* Potencia nominal de la resistencia eléctrica

### 6.2.1 ANÁLISIS

Los tiempos que se asumieron en el aspecto teórico (50 min) conllevaron como resultado una potencia calculada para la resistencia eléctrica de 5,01 kW en el caso con aislante, por tal motivo se empleó una resistencia eléctrica de 5,5 kW (existente en el mercado). Pero hay que considerar que si bien la potencia nominal de la resistencia es suministrada por el fabricante, este tipo de equipo eléctrico tiene una eficiencia real de entre 90 a 95%. Por esta razón, pese a que se utilizó una resistencia eléctrica de 5,5 kW (potencia nominal), la cual es mayor a la potencia calculada, los tiempos reales de calentamiento resultaron ser mayores (con una leve variación) en comparación con los tiempos calculados.

Otra razón de discrepancia entre los cálculos teóricos y los resultados reales son algunas hipótesis asumidas en el balance energético, como las propiedades del aislante, propiedades de convección del aire, convección evaporativa, inexistencia de radiación, condiciones estables, temperaturas uniformes, entre otras. Estos criterios utilizados efectivamente facilitan el cálculo del sistema planteado y brindan una aproximación aceptable para realizar la aplicación real del proyecto que comprende la automatización del equipo.

### **6.3 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN**

- Verificar conexiones de mangueras, válvulas, visor de nivel, sensores, conexiones del PLC, etc.
- Llenar el tanque externo de suministro de agua.
- Abrir la válvula de entrada de agua de alimentación.
- Cerrar la válvula de salida de vapor.
- Cerrar la válvula de purga.
- Conectar el enchufe del motor eléctrico de la bomba hidráulica.
- Conectar el enchufe de la resistencia eléctrica calefactora.
- Presionar el botón de encendido de manera que se dé inicio al ciclo de control del equipo.
- Poner atención al funcionamiento y desempeño del equipo, de manera que al momento de alcanzar la presión de trabajo máxima se debe abrir la válvula de salida de vapor.
- Pulsar el botón de apagado para terminar el ciclo de trabajo del equipo.
- En caso que se desee retirar el agua del interior del caldero, abrir la válvula de purga con las respectivas medidas de seguridad.

### **6.4 MEDIDAS DE SEGURIDAD**

- Durante el calentamiento del caldero tener cuidado en la manipulación del equipo. Pese a que se encuentra aislado, las partes metálicas descubiertas están a altas temperaturas que pueden causar quemaduras graves.
- Evitar golpear o manipular el tubo de vidrio del nivel de líquido, especialmente a altas presiones. Si este tubo presenta fisuras es necesario reemplazarlo inmediatamente por uno nuevo pues representa un riesgo potencial para el personal que se encuentre presente.
- Constatar que los diferentes sensores y actuadores se encuentren en buen estado y funcionando correctamente. Una incorrecta lectura por parte del

PLC conllevaría consecuencias negativas e inclusive daños graves al equipo.

- Medir periódicamente los valores eléctricos de las conexiones de manera que los circuitos eléctricos y electrónicos no sufran sobrecargas.
- Tener especial cuidado con la resistencia eléctrica, ya que si esta se queda sin el contacto de agua durante su funcionamiento se funde instantáneamente con el riesgo de explosión.
- Corregir la presencia de fugas y en caso de que éstas se presenten durante el funcionamiento apagar el equipo.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

- Una vez finalizado el proyecto se ha cumplido el objetivo principal que comprendía el diseño, construcción y automatización de un caldero didáctico de vapor saturado. Este caldero cumple los estándares planteados, tanto en su funcionamiento como en el control automático.
- El equipo diseñado, construido y automatizado constituye un importante aporte para el aprendizaje en el campo de la Automatización Industrial. Surgió como una primera aproximación real del Control Automático para un equipo existente en la industria ecuatoriana.
- La Automatización Industrial de calderos y otros sistemas de generación energética permite lograr una alta productividad y brindar seguridad a la operación de este tipo de equipos industriales.
- Un controlador lógico programable (PLC) simplifica el Control Automático de equipos industriales, ya que reduce el cableado y otros componentes y circuitos eléctricos y electrónicos que se utilizaban con anterioridad. De esta manera, se facilita la aplicación de la Automatización en aplicaciones propias de la Ingeniería Mecánica.

- Los calderos eléctricos constituyen una buena opción en la industria debido a su alta eficiencia y sencilla fabricación y mantenimiento respecto a otros sistemas de calentamiento. Un adecuado control automático lo transforma en un equipo versátil y de operación más sencilla.
- En el diseño y construcción, resulta muchas veces más conveniente desde el punto de vista técnico y económico, utilizar componentes elaborados disponibles en el mercado a tener que fabricar los mismos. Una de las ventajas de realizar una selección, es que si se pueden encontrar ciertas partes que cumplen con las especificaciones o normas requeridas.
- Para el cálculo del proceso termodinámico de este tipo de calderos se asumió un modelo simplificado y práctico, ya que el desarrollo real del proceso implica cálculos muy complejos y variables, muchas veces impredecibles. Sin embargo, los resultados se aproximan a la realidad con precisión aceptable.
- El presente proyecto muestra la factibilidad de construir máquinas funcionales con pequeños presupuestos y automatizarlas de manera práctica. En nuestro país, la microempresa podría capacitarse para poner en marcha estos proyectos.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Se debe contar con la asesoría del personal técnico calificado, especialmente para el diseño, construcción y manejo del equipo, ya que al tratarse de una unidad generadora de energía se manejan altas presiones y temperaturas que podrían ocasionar graves accidentes en casos de descuido o negligencia.
- Tener especial cuidado en las conexiones eléctricas, ya que una mala conexión resulta en daños o mal funcionamiento del equipo. En el PLC, se corre el riesgo de arruinar este dispositivo en caso de que se sobrecarguen las protecciones.
- Se debe realizar un mantenimiento periódico que garantice la vida útil de este equipo. Esto comprende la revisión y comprobación de sus partes, análisis de conexiones eléctricas, entre otros.
- Deberían seguir realizándose más Proyectos de Titulación en el área de Automatización Industrial, siempre innovándose las temáticas con el fin de seguir generando tecnología avanzada en el país. Estos temas podrían enfocarse a otro tipo de calderos: acuotubulares, pirotubulares, etc. De igual manera son aptos para la automatización otros equipos como máquinas herramientas, motores, turbinas, bombas, etc.

## CAPÍTULO 8

### BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN – BRADLEY; Micrologix 1100 Programmable Logic Controller User's Guide.
- BELTRÁN, C.; Medición de Nivel; Colegio Salesiano de Concepción.
- CENGEL, Y.; BOLES, M.; Termodinámica; Cuarta Edición; McGraw-Hill; México, 1999.
- CENGEL, Y.; Transferencia de Calor y Masa; McGraw-Hill; México, 1999.
- CREUS, A.; Instrumentación Industrial.
- DANFOSS A/S; District Heating and Boiler Applications.
- DANFOSS A/S; Data Sheet: Pressure Switches and Thermostats, Types KP and KPI.
- FOX, R.; McDONALD, A.; Introducción a la Mecánica de Fluidos; McGraw-Hill; México, 1989.
- FULTON HEATING SOLUTIONS INC.; Fulton Electric Boilers (Steam Models): Instalation, Operation and Maintenance Manual; Pulasky, NY, USA.
- FULTON BOILER WORKS INC.; Fulton Electric Steam Boilers: From 12 to 1000 kW (1.2 to 100 BHP); Pulasky, NY, USA; Feb. 2007.
- INCROPERA, F.; Fundamentals of Heat and Mass Transfer; John Wiley and Sons, Inc., 4<sup>th</sup> Ed.
- INCROPERA, F.; Fundamentos de Transferencia de Calor; Pearson Educación; Cuarta Edición; México; 1999.
- INSTITUTO NACIONAL DE ENERGÍA (INE); Sistemas de Calderos.
- JACK, H.; Automating Manufacturing Systems with PLCs; 2007.
- LABAT, S.; RODRIGO, S.; Medidores de Nivel.
- NORTON, H.; Sensores y Analizadores; Prentice Hall; México; 2000.
- PANKRÁTOV, G.; Problemas de Termotecnia; Mir; Moscú; 1987.
- SHIELD, C.; Calderas: Tipos, Características y sus Funciones; Compañía Editorial Continental S.A.; México; 1985.

- SQUARE D; 9013 PUMPTROL® Commercial Pressure Switches Type F and 9013 Commercial Pressure Switches Type G Catalog; January, 2007.
- STOECKER, W.; Refrigeración y Acondicionamiento de Aire; McGraw-Hill; Madrid; 1985.
- STREETER, V.; Mecánica de Fluidos; McGraw Hill; México; 1995
- TAPIA, L.; Apuntes de PLC's.
- WATTS REGULATOR CO.; Instalation Instructions: Model 530C Calibrated Pressure Relief Valve, Model 53 and 30L Pressure Relief Valves.
- <http://claymore.engineer.gvsu.edu/~jackh/books>
- <http://es.wikipedia.org>
- <http://ib.cnea.gov.ar>
- <http://literature.rockwellautomation.com>
- <http://www.claytonindustries.com>
- <http://www.codeso.com>
- <http://www.directindustry.es>
- <http://www.electroplaneta.com>
- <http://www.electroportal.net>
- <http://www.fulton.com>
- <http://www.infoplac.net>
- <http://www.juandutari.htmlplanet.com>
- <http://www.monografias.com>
- <http://www.plcmanual.com>
- <http://www.plcs.net>
- <http://www.quiminet.com>
- <http://www.reimersinc.com>
- <http://www.rockwellautomation.es>
- <http://www.savinobarbera.com>
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica>
- <http://www.squared.com>
- <http://www.todoagua.aqua-soft.com.mx>
- <http://www.watts.com>
- <http://www.wescomex.com>

- <http://www.wikiciencia.org>
- <http://www.wikipedia.org>
- <http://yosedleonardo.blogspot.com>