

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN Y MONITOREO DE GASES GENERADOS EN EL CALDERO 3 DEL IESS HOSPITAL DE AMBATO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**DIEGO DANILO VARGAS CULQUI**

[sdieguin@hotmail.com](mailto:sdieguin@hotmail.com)

**DIRECTOR: Ing. JORGE ENRIQUE LÓPEZ VELÁSTEGUI**

[j.lopezvelastegui@gmail.com](mailto:j.lopezvelastegui@gmail.com)

**CO-DIRECTOR: Dr. JORGE ANDRÉS ROSALES ACOSTA**

[androsaco@yahoo.com](mailto:androsaco@yahoo.com)

**Quito, Febrero 2014**

## DECLARACIÓN

Yo Diego Danilo Vargas Culqui, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Diego Danilo Vargas Culqui  
CI. 1804528741 - 1



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**“E SCIENTIA HOMINIS SALUS”**

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos del Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL” bajo el libre consentimiento del autor.

Al consultar esta tesis deberá acatar las disposiciones de la Ley y de las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás***

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Danilo Vargas Culqui, bajo mi supervisión.

---

Ing. Jorge López

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

Dr. Andrés Rosales

**CO-DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

El más grande de mis agradecimientos a Dios, por todas sus bendiciones en cada instante de mi vida.

A mis abuelitos quienes han sido el pilar fundamental de mi vida.

A mis padres, quienes a través de su ejemplo supieron enseñarme el valor del trabajo. Gracias por sus sabios consejos y lecciones de vida.

A mis hermanas, que con amor incondicional, han sabido guiarme cariñosamente.

A mis queridos primos Lourdes y Walter, por acogerme y llevarme generosamente en su vida.

A mi novia Diana, por su apoyo incondicional.

Al IESS Hospital de Ambato, a través del Ingeniero Jorge López, director del proyecto, gracias por la apertura y facilidades brindadas durante la ejecución del Proyecto

Al Dr. Andrés Rosales y al Ing. Germán Castro por sus valiosas observaciones y recomendaciones.

## DEDICATORIA

*Dedicado a las personas más valiosas de mi vida, mi familia; y de forma especial dos seres que han sabido llenarla de alegría, mis hermanos.*

# CONTENIDO

<b>Resumen.....</b>	<b>xvi</b>
<b>Presentación.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONCEPTOS GENERALES .....	1
1.1.1 CALDERA .....	1
1.1.2 GENERADOR DE VAPOR .....	1
1.1.3 ENTALPÍA.....	2
1.1.4 CALOR SENSIBLE .....	2
1.1.5 CALOR LATENTE.....	2
1.1.6 CALOR DE SOBRECALENTAMIENTO .....	2
1.2 Calderos de Vapor: .....	2
1.2.1 capacidad de un caldero de vapor.....	3
1.2.2 Partes Básicas de un caldero .....	3
1.2.3 Clasificación de los calderos.....	4
1.2.4 TIPOS DE CALDEROS EMPACADOS .....	5
1.3 COMBUSTIÓN.....	10
1.3.1 Reacciones Químicas .....	10
1.3.2 Combustibles:.....	11
1.3.3 El aire como comburente.....	13
1.3.4 Exceso de aire.....	17
1.3.5 TIPOS DE COMBUSTIÓN .....	18
1.4 FORMACIÓN DE CONTAMINANTES .....	20
1.4.1 1.4.1 Unidades de medición de los gases .....	21
1.4.2 Componentes de los gases de combustión .....	22
1.5 MÉTODOS DE CONTROL .....	25
1.5.1 Control mecánico .....	25
1.5.2 Control neumático directo.....	25
1.5.3 Control de medida en serie.....	26

1.5.4 Control de medida en paralelo.....	26
1.5.5 Control de medida en paralelo con límites cruzados .....	26
1.6 TIPOS DE CONTROL CON CORRECCIÓN POR MEDIDA.....	27
1.6.1 Corrección por medida de O <sub>2</sub> .....	27
1.6.2 Control por medida de CO <sub>2</sub> .....	28
1.6.3 Control por medida del CO .....	28
1.6.4 Corrección por medida de las pérdidas .....	29
1.7 Equipo para ahorro de energía .....	30
1.8 Rendimiento en un caldero .....	30
1.8.1 Método Directo .....	31
1.8.2 Método Indirecto .....	31
1.9 Calidad de Vapor .....	33
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>35</b>
2.1 SISTEMA Generador DE VAPOR .....	35
2.1.1 Suministro de agua .....	36
2.1.2 Sistema de Suministro de Diesel .....	39
2.2 Diagrama de Función del Caldero .....	39
2.3 DIAGRAMA P&ID DEL CALDERO .....	40
2.3.1 Especificación de Actuadores:.....	43
2.4 Descripción del Caldero:.....	44
2.4.1 Quemador.....	44
2.4.2 Constitución del quemador:.....	45
2.4.3 Sistema impulsor de aire para la combustión .....	46
2.4.4 Sistema de Alimentación de Diesel .....	46
2.4.5 Sistema Integral de regulación de Diesel y Aire Presurizado: .....	47
2.4.6 Inyector de Diesel:.....	48
2.4.7 Regulación de tasa de combustión:.....	48
2.4.8 Sistema de Gas: .....	49
2.4.9 Sistema de control:.....	49
2.4.10 CONTROL DE NIVEL DEL CALDERO:.....	50
2.4.11 CONTROLES DE PRESIÓN:.....	54
2.4.12 Detector de llama de Combustión.....	57



2.4.13 Elementos auxiliares:.....	58
2.4.14 Módulo de Relé Serie 7800 L.....	59
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>62</b>
3.1 Diseño del sistema de control.....	63
3.1.1 Sistema de control de nivel.....	63
3.1.2 Detección de llama: .....	65
3.1.3 Medición de presión:.....	66
3.1.4 Medición de Temperatura: .....	68
3.1.5 Medición Monóxido de Carbono.....	71
3.1.6 Descripción Funcionamiento de detectores instalados en el caldero:.....	76
3.1.7 Actuadores: .....	76
3.1.8 Control de damper: .....	77
3.1.9 Control de Modutrol:.....	79
3.1.10 Circuito de control: .....	84
3.2 Controlador Lógico Programable (PLC).....	85
3.2.1 TIA PORTAL.....	87
3.2.2 STEP 7 Basic.....	88
3.3 Descripción Constructiva del sistema:.....	90
3.4 Tablero de control .....	92
3.5 Descripción del Programa de control: .....	92
3.5.1 Modo de prueba:.....	94
3.5.2 Arranque: .....	95
3.5.3 modos de funcionamiento: .....	97
3.5.4 Apagados:.....	99
3.6 Arranque de PROGRAMA.....	99
3.7 Control PID.....	100
Acción Proporcional P .....	102
Acción Integral I .....	102
Acción derivativa D.- .....	102
3.7.1 BLOQUE PID COMPACT DEL S7-1200.....	104
3.7.2 Optimización Inicial: .....	104
3.7.3 Optimización Fina: .....	105

<b>Capítulo 4</b> .....	<b>106</b>
4.1 HMI – HUMAN MACHINE INTERFACE.....	106
4.2 Entorno de Programación.....	108
4.3 Estructura de Programación .....	112
4.4 Avisos HMI .....	113
Avisos de Errores.-.....	113
Aviso de sistema.....	113
Aviso de Alarmas.-.....	113
4.5 Administración de usuarios .....	114
Grupo de Administradores .....	114
Grupo de usuarios.-.....	114
4.6 Estructura de programación .....	114
 <b>Capítulo 5</b> .....	 <b>116</b>
5.1 PRUEBA DE SENSORES Y DETECTORES .....	116
5.1.1 CONTROL DE NIVEL.....	116
5.1.2 LIMITES DE SEGURIDAD .....	117
5.1.3 GESTIÓN SISTEMA GENERADOR DE VAPOR.....	117
5.1.4 SENSORES.....	118
Sensor de llama.....	118
5.1.5 Sensor de Presión .....	118
5.1.6 Sensor de temperatura .....	120
5.1.7 Sensor de Monóxido de Carbono (CO) .....	120
5.2 Prueba de Salidas Digitales: .....	121
5.2.1 Fuente de Ignición .....	121
5.2.2 Electroválvulas.....	121
5.2.3 Salida de alarma .....	122
5.2.4 Motor Ventilador.....	122
5.2.5 Motor del Compresor .....	122
5.3 Salidas Analógicas .....	123
5.3.1 Control Modutrol.....	123

5.3.2 Control Damper .....	124
5.4 Medidor de Temperatura de Gases: .....	125
5.5 Determinación Modelo Equivalente .....	125
5.5.1 Modelo lazo de Control de Presión .....	125
5.5.2 Sintonización de Controlador PID de Presión .....	129
5.5.3 Modelo lazo de Control Monóxido de Carbono .....	130
5.5.4 Sintonización de Controlador PID de Monóxido de Carbono .....	134
5.5.5 Estructura Compuesta .....	135
5.5.6 Consideraciones de Modelo.....	137
5.5.7 Reducción de Función de Transferencia .....	141
5.6 Pruebas de FUNCIONAMIENTO: .....	143
5.6.1 Respuesta de los Sistemas de Control .....	144
5.6.2 Temperatura de Llama:.....	144
5.6.3 Cálculo combustión estequiométrica .....	145
5.6.4 EMISIONES REALES DE GASES: .....	148
5.6.5 Rendimiento.....	151
5.6.6 Ahorro por optimización.....	151
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>153</b>
6.1 Conclusiones: .....	153
6.2 Recomendaciones: .....	155
<b>Trabajos citados.....</b>	<b>156</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>I</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Balance energético en un caldero [2]	2
Figura 1.2. Caldero Típico [5]	4
Figura 1.3. Caldero de tubos de humo horizontal con varios pasos por los tubos. [6]	6
Figura 1.4. Estructura de un Caldero Piro-tubular [3]	6
Figura 1.5 Trayecto de circulación de gases [7]	6
Figura 1.6. Caldero de cámara húmeda de tres pasos [5]	7
Figura 1.7. Configuración de caldera acuotubular [5]	8
Figura 1.8. Caldero acuotubular [7]	8
Figura 1.9. Caldero de tubos rectos [8]	9
Figura 1.10. Calderas acuotubulares de tubos doblados [6]	9
Figura 1.11. Flujo de Aire para la combustión [11]	13
Figura 1.12. Rendimiento de un caldero en función del exceso de aire [9]	18
Figura 1.13. Combustión con exceso de aire [12]	18
Figura 1.14. Combustión completa [12]	19
Figura 1.15. Composición de humos en función del exceso de aire [12]	20
Figura 1.16. Esquemas de control de Calderos [2]	25
Figura 1.17. Control mecánico de un caldero [15]	25
Figura 1.18. Lazo de Control en paralelo con límites cruzados [15]	26
Figura 1.19. Lazo de Control de %O <sub>2</sub> [16]	28
Figura 1.20. Relación entre exceso de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> en la salida de un caldero operado a carga cte. [17]	28
Figura 1.21. Concentración de CO y curvas de carga [16]	29
Figura 1.22. Estructuras de Control [16]	29
Figura 1.23. Pérdidas en función del exceso de aire [17]	30
Figura 1.24. Equipo de ahorro energético [7]	30
Figura 1.25. Factores que inciden en la pérdida de energía [10]	31
Figura 2.1. Sistema de generación y distribución de vapor, retorno de condensado, alimentación de agua hacia el caldero [7]	36
Figura 2.2. Suministro de Diesel a los calderos del IESS Hospital de Ambato. [18]	39
Figura 2.3 Diagrama Funcional Sistema Generador de Vapor	40
Figura 2.4. Caldero N° 03 del IESS Hospital de Ambato con sus datos de placa	44
Figura 2.5 Sistemas asociados a la combustión en el quemador [19]	45
Figura 2.6 Estructura del quemador [19]	45
Figura 2.7 Sistema Impulsor de aire [20]	46
Figura 2.8 Línea de suministro de diesel al caldero. [20]	47
Figura 2.9 Sistema Integral de regulación de Diesel y tanque de Aire [21]	47
Figura 2.10 Inyector de Diesel [21]	48
Figura 2.11 Sistema actuador regulación de combustión [21]	49
Figura 2.12 Circuito de Ingreso de GLP hacia el quemador del caldero [21]	49
Figura 2.13. Disposición y Puntos de trabajo de Mc Donell [22]	51
Figura 2.14 Diagrama eléctrico de contactos internos McDonel [22]	51
Figura 2.15 Esquema de funcionamiento Control de nivel Warrick [23]	52
Figura 2.16 Montaje y constitución de un controlador de Presión [25]	54
Figura 2.17 Diagrama esquemático interno de Contactos Control de Presión [25]	54

Figura 2.18. Partes de un control proporcional Pressuretrol. [26]	55
Figura 2.19. Puntos de Operación y conexión a un motor modulante [27]	55
Figura 2.20 Conexión entre modutrol y Controlador de presión serie 90 [27]	56
Figura 2.21 Tipos de detectores de Llama [28]	57
Figura 2.22 Montaje de un Detector de Llama en una cámara de combustión. [29]	58
Figura 2.23 Secuencia de Funcionamiento Relé de control Honeywell RM7800L [30]	61
Figura 3.1 Estructura de Control del Sistema	62
Figura 3.2. Operación de dispositivos para Control de nivel	64
Figura 3.3 Conexión controles de nivel de agua.	64
Figura 3.4. Esquema de conexión de sensor de llama [31]	65
Figura 3.5 Esquema de conexión transmisor de presión [32]	67
Figura 3.6. Error producto de la conexión [35]	70
Figura 3.7 Circuito básico de prueba y circuito simple del sensor de CO MQ-7 [36]	72
Figura 3.8 Respuesta sensor de CO [36]	73
Figura 3.9. Sensibilidad y dependencia de la temperatura de sensor MQ-7 [36]	74
Figura 3.10 Convertidor de voltaje a corriente	74
Figura 3.11. Diagrama de acondicionamiento sensor de CO	76
Figura 3.12. Sensor de Monóxido de carbono y placa de acondicionamiento	76
Figura 3.13 Diagrama de Flujo control de compuerta de Damper	78
Figura 3.14. Características de un motor de Pasos [37]	78
Figura 3.15 Esquema de pruebas de modutrol [27]	80
Figura 3.16 Diagrama de bloques y terminales MCP4150 [38]	80
Figura 3.17 Posibles configuraciones del potenciómetro MCP 4150 [38]	81
Figura 3.18 Descripción Byte de comandos [38]	82
Figura 3.19 Diagrama de tiempo escritura instrucciones o nuevos datos. [38]	82
Figura 3.20 Variación de resistencia ante variaciones de temperatura. [38]	83
Figura 3.21 Diagrama de Flujo control de posición de Modutrol Honeywell	83
Figura 3.22 Diagrama de control Modutrol y Damper	84
Figura 3.23. Placa de control Modutrol y Damper	84
Figura 3.24 Distribución partes del PLC Siemens S7-1200 1212C [34]	85
Figura 3.25 Conexión entre termocupla y Signal Board [34]	86
Figura 3.26 Conexión entradas y salidas a módulos E/S analógicas [34]	87
Figura 3.27. Esquema de Organización TIA Portal V11. [39]	88
Figura 3.28 Ejecución de programa de usuario [34]	90
Figura 3.29. Diagrama de entradas y salidas al PLC	91
Figura 3.30. Tablero de Control del sistema	92
Figura 3.31. Diagrama de flujo programa principal	93
Figura 3.32. Diagrama de flujo modo de prueba	94
Figura 3.33. Diagrama de Flujo Arranque	96
Figura 3.34. Diagrama de Flujo Funcionamiento Manual	97
Figura 3.35. Diagrama de Flujo funcionamiento Semiautomático	98
Figura 3.36. Diagrama de Flujo Funcionamiento Automático	98
Figura 3.37. Diagramas de Flujo Apagado del caldero	99
Figura 3.38. Configuración modo de Arranque del PLC [40]	100
Figura 3.39. Comparación respuesta de diferentes tipos de control [40]	100
Figura 3.40. Diagramas de Bloque PID y AntiWindup del S7-1200 [40]	101
Figura 3.41. Características de la respuesta de un sistema a la entrada paso [40]	103
Figura 3.42. Proceso de Optimización Inicial. [40]	105

<i>Figura 3.43. Proceso de Optimización Fina. [40]</i>	105
<i>Figura 4.1. Esquema de organización de sistema [39]</i>	106
<i>Figura 4.2. Partes Constitutivas Panel KP300 Basic de Siemens [41]</i>	107
<i>Figura 4.3 Creación de Programa TIA Software V11</i>	109
<i>Figura 4.4 Configuración de Dispositivos en TIA V11</i>	110
<i>Figura 4.5 Configuración Panel HMI en TIA V11</i>	110
<i>Figura 4.6 Configuración HMI</i>	110
<i>Figura 4.7 Configuración de Imágenes de HMI</i>	111
<i>Figura 4.8 Configuración Red de Comunicación</i>	112
<i>Figura 4.9. Pantalla de Programación TIA Portal V11 para HMI</i>	113
<i>Figura 4.10. Pantalla de configuración de avisos</i>	114
<i>Figura 4.11. Pantalla de Configuración De Usuarios</i>	114
<i>Figura 4.12. Diagrama de Organización Programa de Panel HMI</i>	115
<i>Figura 5.1. Medidores de Presión de Vapor</i>	118
<i>Figura 5.2. Medición de Presión SITRANS y Manómetro</i>	120
<i>Figura 5.3 Respuesta del sensor de Monóxido de Carbono</i>	121
<i>Figura 5.4. Válvulas Solenoides [43]</i>	122
<i>Figura 5.5. Disposición Física Modutrol</i>	124
<i>Figura 5.6. Características generales de un Damper de dos aletas</i>	124
<i>Figura 5.7. Medidor de Temperatura de Gases de Chimenea Bimetálico [44]</i>	125
<i>Figura 5.8 Respuesta real del sistema de Presión a Lazo abierto</i>	126
<i>Figura 5.9 Tiempos de crecimiento de curva de reacción lazo de control de Presión</i>	126
<i>Figura 5.10 Respuesta de Modelos sistema de Control de Presión determinados</i>	128
<i>Figura 5.11 Sintonización de constantes PID de Presión</i>	129
<i>Figura 5.12 Comparación de respuesta sintonización real y teórica</i>	130
<i>Figura 5.13 Tiempos de crecimiento de curva de reacción lazo de control de CO</i>	130
<i>Figura 5.14 Respuesta de Modelos sistema de Control de CO determinados</i>	133
<i>Figura 5.15 Ajuste de tiempo Muerto en modelo de control de CO</i>	133
<i>Figura 5.16 Ajuste parámetros PID control de CO</i>	134
<i>Figura 5.17 Comparación regulación parámetros PID teórico y real</i>	135
<i>Figura 5.18 Autosintonía real de parámetros PID de PLC</i>	135
<i>Figura 5.19 Relación del volumen de aire con la altura y temperatura [47]</i>	138
<i>Figura 5.20 Efecto de dilución del contenido en humedad y del exceso de aire [48]</i>	138
<i>Figura 5.21 Identificación del Sistema a partir de la herramienta "System Identification Tool" de Matlab</i>	139
<i>Figura 5.22 Respuesta del modelo de llenado contenido líquido</i>	140
<i>Figura 5.23 Respuesta real de los sistemas de Control</i>	144
<i>Figura 5.24 Composición de gases expulsados en función del exceso de para Diesel (poder calorífico aprox. 18700 BTU/lb) [16]</i>	150
<i>Figura 5.25 Curva de eficiencia de combustión del caldero en base al exceso de aire [17]</i>	151
<i>Figura 5.26 Ahorro de combustible por reducción de exceso de oxígeno [17]</i>	151

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Transferencia de calor Típica en un caldero pirotubular de tres pasos [5]</i>	7
<i>Tabla 1.2. Clasificación de los combustibles [11]</i>	11
<i>Tabla 1.3. Variación del volumen de un gas ideal con la temperatura [9]</i>	13
<i>Tabla 1.4. Oxígeno y Aire necesarios en una Combustión Estequiométrica [9]</i>	14
<i>Tabla 1.5. Contenido químico en gases de salida [9]</i>	16
<i>Tabla 1.6. Factores de conversión para las unidades relacionadas a la energía [9]</i>	22
<i>Tabla 1.7. Puntos de Rocío Ácido en dos combustibles [9]</i>	24
<i>Tabla 1.8. Métodos de análisis de gases de combustión [15]</i>	27
<i>Tabla 2.1 Lista de Componentes del Sistema</i>	42
<i>Tabla 2.2. Características Eléctricas de Contactos Mc Donell [22]</i>	52
<i>Tabla 2.3. Formas de Conexión relé de control de Nivel Warrick [24]</i>	53
<i>Tabla 3.1. Elementos de entrada al PLC</i>	63
<i>Tabla 3.2. Actuadores</i>	63
<i>Tabla 3.3. Características Transmisor de presión SITRANS P220 de Siemens [32]</i>	66
<i>Tabla 3.4. Valores de entrada permisibles al signal Board [34]</i>	69
<i>Tabla 3.5. Datos Técnicos Sensor de CO MQ-7 [36]</i>	71
<i>Tabla 3.6. Respuesta de los detectores ante un cambio de variable.</i>	76
<i>Tabla 3.7. Actuadores</i>	77
<i>Tabla 3.8. Estimación de la controlabilidad de un sistema según Siemens [40]</i>	103
<i>Tabla 3.9. Cálculo de Valores de las constantes PID [34]</i>	104
<i>Tabla 4.1. Disponibilidad de Funciones Panel KP300 Basic de Siemens [42]</i>	107
<i>Tabla 5.1. Medidas de Presión Reales Obtenidas</i>	119
<i>Tabla 5.2. Lectura de temperatura antes y después de una compensación</i>	120
<i>Tabla 5.3. Respuesta de Modutrol ante el sistema de control</i>	123
<i>Tabla 5.4. Voltajes de control de Damper medidos</i>	124
<i>Tabla 5.5 Desviación entre constantes reales y teóricas de PID de presión</i>	130
<i>Tabla 5.6 Desviación entre constantes teóricas y reales PID de CO</i>	134
<i>Tabla 5.7 Comparación entre composición relativa [48]</i>	138
<i>Tabla 5.8. Estimación de Temperatura de llama según color. [50]</i>	144
<i>Tabla 5.9. Proporciones Contenido de Diesel N°02</i>	145
<i>Tabla 5.10 Determinación de Emisiones Gaseosas</i>	149
<i>Tabla 5.11 Comparación de emisiones entre los sistema de control</i>	150

## RESUMEN

Los generadores de vapor constituyen un papel muy importante en la industria, su operación se basa en la transformación de la energía química contenida en combustibles fósiles a energía térmica a partir de su combustión; en los últimos años el consumo de dichos combustibles ha sido masivo, por lo que el riesgo de que se agoten cada vez es mayor; por otra parte, la combustión es un proceso que impacta en el ambiente, dañándolo, debido a las emisiones de gases contaminantes en la atmósfera. De aquí la importancia de mejorar la eficiencia global en la utilización del calor contenido en el combustible, diseñando sistemas capaces de aprovechar adecuadamente este calor y mejorar el rendimiento del proceso de combustión.

El objetivo principal del presente trabajo es implementar un nuevo sistema de control que mejore la calidad de combustión en el caldero N°03 del IESS Hospital de Ambato.

Sustentado en la teoría química, se consigue optimizar la combustión regulando la cantidad de aire y combustible que reaccionan, éstas cantidades se establecen a partir del monitoreo de emisiones de monóxido de carbono y la presión en la línea de vapor respectivamente; el sistema dispone también de un panel HMI donde el operador puede observar el estado de las variables controladas.

El trabajo comprende el estudio de los sistemas generadores de vapor, sistemas asociados, operación y funcionamiento de cada elemento constitutivo del caldero con el fin de controlar las principales variables y garantizar calidad, seguridad y eficiencia. Para el diseño del nuevo sistema se han considerado: las recomendaciones del fabricante, experiencia de técnicos en calderos, características del proceso, entre otros.

La evaluación de resultados se hace a partir del análisis de gases producidos en la combustión, realizado por el Centro de Investigaciones y Control Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional (CICAM), antes y después de la implementación del nuevo sistema de control, en el que se observa un aumento significativo de la eficiencia del caldero.



## PRESENTACIÓN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un nuevo sistema de control de combustión implementado en el Caldero N° 03 del IESS Hospital de Ambato, el proyecto está estructurado en 6 capítulos que se detallan a continuación:

El primer capítulo presenta un estudio sobre calderos, el análisis químico de: combustión estequiométrica, exceso de aire, flujo de gases producidos, tipos de combustión. Se describen algunos métodos de control de combustión, equipos de ahorro energético para el caldero, aspectos generales que intervienen en el rendimiento de un caldero y los métodos para calcular la calidad de vapor producido.

En el segundo capítulo se describe el sistema antiguo instalado, los sistemas asociados al caldero, componentes mecánicos, sensores, detectores y actuadores instalados, además de analiza la operación y secuencia de funcionamiento del controlador de combustión Honeywell Módulo de Relé 7800L.

El tercer capítulo incluye el diseño del nuevo sistema de control, consideraciones de diseño, descripción de los nuevos sensores añadidos, lógica de funcionamiento, software de programación, controlador lógico programable utilizado y la estructura de control interna del PLC; además se presenta el diseño de acondicionamientos implementados.

El cuarto capítulo muestra el diseño y características del HMI creado a partir de un panel básico de Siemens, características, entorno de programación en el software TIA Portal V11.

En el quinto capítulo se analiza el funcionamiento del nuevo sistema implementado, se detalla el comportamiento de cada uno de los elementos constitutivos del sistema y se cuantifica el aumento de eficiencia del equipo.

Finalmente, el sexto capítulo muestra las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

En los sistemas generadores de vapor convencionales; particularmente nuestro caso, el calor usado es obtenido a partir de combustibles, sin ser ésta la única manera de producirlo; sin embargo, es uno de los sistemas más utilizados en la industria ecuatoriana por ello encontramos diversos tipos de calderos, cada uno adopta prestaciones de acuerdo a su aplicación, siendo el factor principal la potencia.

En este capítulo se hace un estudio de los tipos de calderos, constitución, características, se analiza la combustión tanto teórica como real; elementos que influyen directamente en su rendimiento, se presentan sistemas mecánicos de ahorro energético, modelos de sistemas de control para calderos, métodos para calcular el rendimiento del caldero y calidad de vapor producido.

### 1.1 CONCEPTOS GENERALES

#### 1.1.1 CALDERA

“Es todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en utilizable, en forma de calorías, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.” Ref. [1]

“En el interior de un caldero se produce un intercambio de calor entre los gases procedentes de la combustión con agua o aceite cuya finalidad es la producción de vapor o calentamiento, dependiendo del fluido que se use para transportar calor, podemos encontrar: Calderos de Vapor, Calderos de Aceite Térmico y Calderos de Agua Caliente.” Ref. [2]

#### 1.1.2 GENERADOR DE VAPOR

“Se llama así al conjunto o sistema formado por una caldera y sus accesorios.

En la práctica se habla de “calderos” refiriéndose a todo el conjunto o “generador de vapor”. Por tal razón, en adelante, se usa indistintamente ambos términos.”  
Ref. [3]

### 1.1.3 ENTALPÍA

Cantidad total de calor absorbido por un cuerpo, puede traducirse en un aumento de energía interna y/o trabajo. Si no se produce trabajo:  $\Delta H = \Delta E$  y si se produce trabajo:  $\Delta H = \Delta E \pm W$ , es decir que el cambio de entalpía es igual al cambio de energía interna más el trabajo realizado sobre el sistema o menos el trabajo realizado por el sistema.

### 1.1.4 CALOR SENSIBLE

Cantidad de calor que produce una elevación de la temperatura de un cuerpo sin que produzca cambio de fase (Kcal/kg).

### 1.1.5 CALOR LATENTE

Cantidad de calor que produce un cambio de fase del cuerpo sin que cambie la temperatura (Kcal/kg).

### 1.1.6 CALOR DE SOBRECALENTAMIENTO

Cantidad de calor necesario para elevar a presión constante, la temperatura del vapor sobre la temperatura de saturación (Kcal/kg). [2]

## 1.2 CALDEROS DE VAPOR:

En la Figura 1.1, se representa el balance de energía para un caldero de vapor:

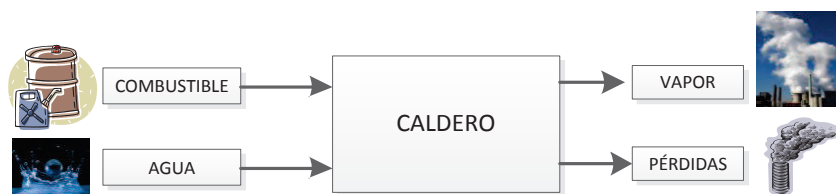


Figura 1.1. Balance energético en un caldero [2]

Mediante la combustión se obtiene energía en forma de calor, la cual es transmitida al agua previamente tratada y así formar el vapor necesario para transportar energía calórica y ser liberada cuando el vapor se transforme nuevamente en agua, el vapor es un conductor muy eficiente de esta energía; es versátil, seguro y completamente estéril.

En el proceso de convertir agua en vapor se producen varias pérdidas entre éstas encontramos: pérdida de energía en los gases de combustión que son expulsados al ambiente, pérdidas de energía por radiación, entre otras.

### **1.2.1 CAPACIDAD DE UN CALDERO DE VAPOR**

La unidad normada para representar la potencia de un caldero es el BHP y se define como la cantidad de energía necesaria para convertir 34,5 libras de agua por hora a 100°C a vapor seco saturado en la misma temperatura; es una unidad de energía definida por el Boiler Code Test Committee de la American Society of Mechanical Engineers, ASME. Se encuentra también el kg/h o lb/h de vapor producido, en otros casos Kcal/h ó BTU/hr de calor absorbido; y para calderas de centrales térmicas de gran capacidad de generación puede darse en megawatios. Un BHP es 33.475 BTU por hora (cerca de 9.809,5 watts). [4]

### **1.2.2 PARTES BÁSICAS DE UN CALDERO [2]**

- **Hogar.**- Es el lugar donde se produce la combustión.
- **Tubos.**- A través de cuya superficie lateral se produce el intercambio de calor entre los gases de combustión y el agua a ser evaporada.
- **Chimenea.**- Para la salida de los gases de combustión a la atmósfera luego que han cedido el calor para la evaporación.

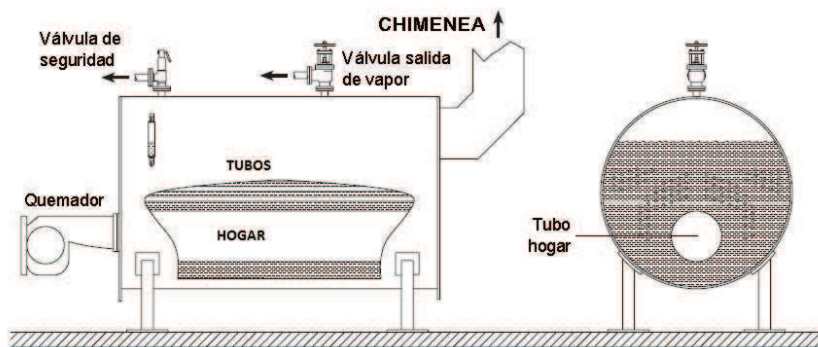


Figura 1.2. Caldero Típico [5]

### 1.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS CALDEROS

Los calderos pueden clasificarse según diferentes criterios, así podemos mencionar los siguientes:

- **Por el montaje:**
  - *Construidos en el sitio.*- Se trasladan en piezas. Tienen mayor capacidad de generación de vapor que los empacados, poseen diseños estándares compactos.
  - *Empacados.*- Son ensamblados en la planta que los fabrica y luego de su instalación están listos para entrar en operación, su capacidad máxima llega hasta 300.000 lb de vapor/h.
- **Por la circulación de los fluidos:**
  - *De circulación natural.*- La circulación de agua se produce de forma natural por diferencia de densidades del agua.
  - *Circulación Forzada.*- El agua circula por la acción de una bomba de circulación exterior.
- **Por el mecanismo dominante de transferencia de calor:** De convección o de radiación.
- **Por el combustible empleado:** Combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.
- **Por la presión:** De baja, mediana, alta presión, supercríticas.
- **Por su movilidad:** Puede ser fija o móvil.
- **Por el Tiro:**

- *Tiro natural*.- Cuentan con un circuito que toma el aire necesario para la combustión del ambiente y expulsa los gases por un tubo de evacuación que aprovecha el efecto chimenea (tiro natural). Por motivos de seguridad, es muy importante garantizar el tiro de la chimenea para evitar el retroceso de los humos.
- *Inducido o forzado*.- La combustión se realiza también con el aire del ambiente, pero los gases se expulsan por medio de un ventilador.
- **Por la producción de vapor:** calderas chicas, producen 1 o 2 toneladas de vapor saturado por hora; medianas, 20 toneladas de vapor saturado por hora y grandes, entre 500 y 600 toneladas de vapor saturado por hora.
- **Por el método de control:** Control manual, semiautomático o automático.

#### 1.2.4 TIPOS DE CALDEROS EMPACADOS

Debido a la capacidad que ofrecen, éste tipo de calderos son los más utilizados en la industria y su clasificación está en función de la ubicación de los fluidos entre los que se intercambia calor, pueden ser:

##### **Calderos de Tubos de Humo o Piro tubulares**

Consisten en recipientes cilíndricos que tienen tubos que pasan a través de ellos. El haz de tubos generalmente es horizontal, aunque puede ser también vertical en los de menor capacidad.

La combustión se realiza en cámaras cilíndricas ubicadas en el interior y los gases calientes circulan por los tubos, dispuestos en varios pasos, cediendo el calor al agua contenida en el recipiente antes de salir por la chimenea.

El número de pasos en un caldero horizontal es otra característica importante, mientras exista más número de pasos, los gases de combustión transfieren más calor al agua y se enfrían, ocupando menos volumen a medida que progresan por los diferentes pasos. El número de tubos se reduce notablemente para mantener la velocidad de los gases, actualmente el límite práctico de pasos es cuatro.

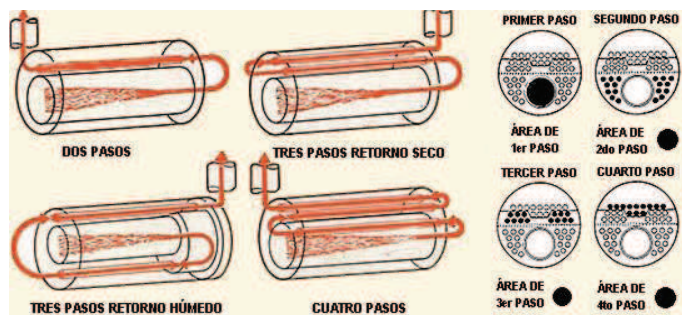


Figura 1.3. Caldero de tubos de humo horizontal con varios pasos por los tubos. [6]

La **Figura 1.3** muestra la disposición de la cámara de combustión y de los tubos para la circulación de los gases en un caldero de tubos de humo.

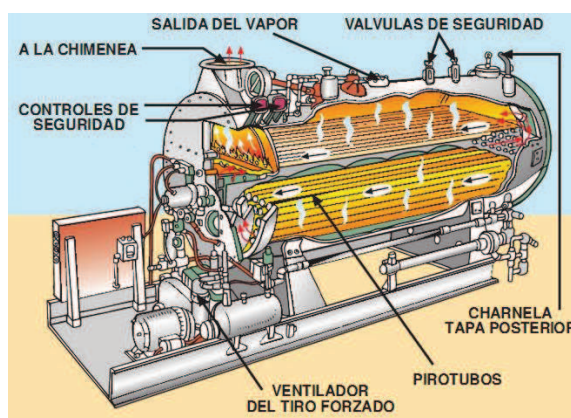


Figura 1.4. Estructura de un Caldero Piro tubular [3]

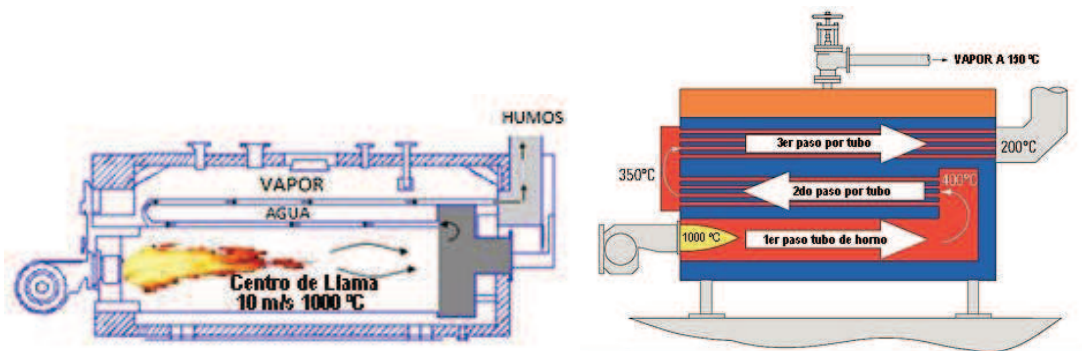


Figura 1.5 Trayecto de circulación de gases [7]

Cabe mencionar que los calderos piro tubulares se clasifican en: Tubulares de retorno horizontal, tipo marina escocesa, horizontal económica, tubular vertical y caldera vertical sin tubos, según la construcción de la cámara pueden ser de cámara seca o húmeda.

La **Figura 1.6** muestra un caldero de tres pasos con cámara húmeda:

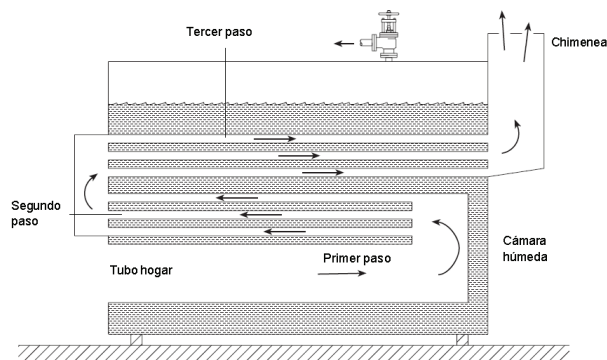


Figura 1.6. Caldero de cámara húmeda de tres pasos [5]

Los datos de transferencia de calor típicos para una caldera económica de tres circuitos y cámara húmeda pueden verse en la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1 Transferencia de calor Típica en un caldero pirotubular de tres pasos [5]

	Área de Tubos	Temperatura	Proporción del Total de transferencia de calor
1 <sup>er</sup> paso	11 m <sup>2</sup>	1600 °C	65 %
2 <sup>do</sup> paso	43 m <sup>2</sup>	400 °C	25 %
3 <sup>er</sup> paso	46 m <sup>2</sup>	350 °C	10 %

### Calderos de Tubos de Agua o Acuotubulares

En los calderos de tubos de agua, el agua circula por el interior de los tubos. La transferencia de calor se produce desde los gases de combustión calientes que circulan por el exterior de los tubos que contienen agua circulante en convección natural. En este tipo de calderos, el hogar está conformado por paredes de tubos de agua, en ellas el intercambio es básicamente por radiación desde la llama.

“Los calderos acuotubulares suelen ser consideradas para altos rendimientos de vapor, para presiones altas o para vapor recalentado. Para la mayoría de aplicaciones industriales y comerciales, una caldera pirotubular es a menudo la más apropiada. Sólo es necesario usar una caldera acuotubular si se requiere un rendimiento individual superior a 27.000 kg/h o presiones superiores a 27 bar o temperaturas de vapor superiores a 340°C. La razón es que para un rendimiento dado, los calderos acuotubulares son de construcción más costosa que los calderos pirotubulares compactos.” [5]



Para tener una idea de la diversidad de calderos acuotubulares, las unidades varían entre aproximadamente 2.000 kg/h hasta las de 3.500.000 kg/h y superiores que impulsan las centrales eléctricas. Las unidades más pequeñas pueden fabricarse y entregarse al sitio en una pieza. Las unidades más grandes generalmente se fabrican en secciones y se transportan al sitio para un ensamblaje final. Las calderas acuotubulares trabajan con el principio de circulación de agua, como se muestra en el siguiente diagrama:

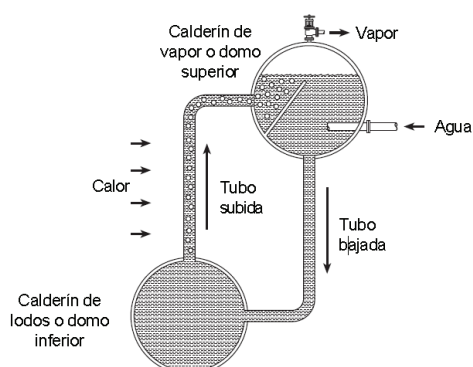


Figura 1.7. Configuración de caldera acuotubular [5]

La alimentación de agua se ubica en el calderín superior o domo, al tener mayor densidad que el agua caliente contenida desciende hasta el calderín de lodos, el agua se calienta al circular por los tubos de subida y consecuentemente disminuye su densidad al formar vapor, la mezcla agua caliente y vapor pasan al calderín superior, en donde se separan.

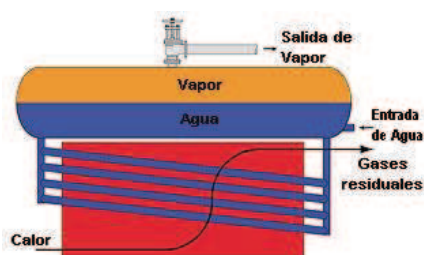


Figura 1.8. Caldero acuotubular [7]

Los calderos acuotubulares según la disposición de los tubos pueden ser:

- *Calderos de Tubos rectos.*- No son muy usuales. En este tipo de calderos los tubos se disponen en banco con inclinación de 5 a 15 grados.

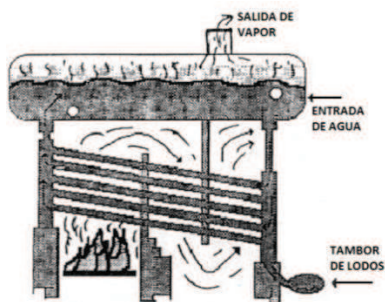


Figura 1.9. Caldero de tubos rectos [8]

- *Calderos de tubos doblados.*- Tienen mayor capacidad que los de tubos rectos. Poseen tubos colocados alrededor de la cámara, los de la parte superior almacenan agua y vapor; los colocados en la parte inferior son para recolección de lodos. La circulación se hace por convección natural. Tienen tres formas básicas de diseño, dadas por la forma que adquiere la disposición de los tubos: A, D, O, Existiendo diseños combinados más complejos.

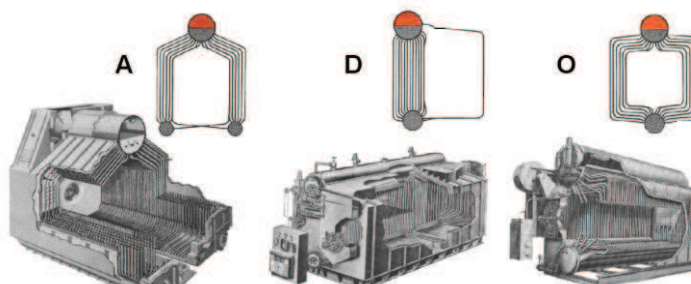


Figura 1.10. Calderas acuatubulares de tubos doblados [6]

Si se comparan los calderos de tubos de agua con los calderos de tubos de fuego, resultan ser:

De mayor capacidad y eficiencia; pueden trabajar a presiones más elevadas; son más seguros cualquier fuga no produce descompresión en el sistema; suministran vapor con mayor rapidez y permiten atender demandas fluctuantes; tienen mayor reserva; son más accesibles para la limpieza, inspección y mantenimiento. [2]

## 1.3 COMBUSTIÓN

“Se define la combustión como una reacción química rápida exotérmica en la que se realiza la oxidación de una sustancia y la reducción de otra. Las temperaturas de combustión oscilan entre 1000 °C y 1650 °C.” Ref. [9]

A la reacción del oxígeno con otra sustancia se lo conoce como oxidación, este proceso tiene como resultado desprendimiento de calor: El término oxidación se utiliza cuando ocurre un proceso lento, en donde el calor se disipa al ambiente y el cuerpo que se oxida no presenta aumento de temperatura. En cambio, cuando el proceso es rápido, la reacción se produce con un gran aumento de temperatura y alcanza el estado de incandescencia, emisión de luz, entonces se conoce como combustión.

Los tres elementos necesarios para que se produzca la combustión son:

- **Comburente:** Es la sustancia que se reduce. El comburente normal es el oxígeno contenido en el aire, se considera el agente que provoca esa reacción exotérmica.
- **Combustible:** Es la sustancia que se combina con el oxígeno y se oxida, es decir, el elemento que se quema. Generalmente carbono.
- **Fuente de ignición:** Cualquier fuente con suficiente energía para iniciar una combustión [10]; su temperatura debe ser la suficiente para producir el encendido, su valor influye de forma directamente proporcional en la velocidad de la reacción de oxidación/combustión.

### 1.3.1 REACCIONES QUÍMICAS

Para que tenga lugar el proceso de combustión se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Proporción adecuada y mezcla uniforme de combustible/comburente.
- Que se establezca la temperatura de ignición de forma que el combustible continúe su ignición sin calor externo una vez iniciada la combustión.

La reacción se verifica con emisión de energía luminosa y calórica; las principales reacciones y energía térmica que se producen en la combustión, son:



### 1.3.2 COMBUSTIBLES:

Todos los combustibles contienen el elemento carbono en su composición, se encuentra combinado con hidrógeno y otras sustancias que podrían participar en la combustión. Según la naturaleza (cantidad de carbono que contenga) del combustible estarán definidas sus propiedades. La **Tabla 1.2** presenta la clasificación de los combustibles según su estado físico:

Tabla 1.2. Clasificación de los combustibles [11]

<b>Combustibles</b>	<b>Naturales O Primarios</b>	<p><b>Sólidos</b> Carbón, madera, biomasa. Algunos metales (costo muy elevado), uranio (elemento radioactivo que genera la fisión en un reactor nuclear)</p> <p><b>Líquidos</b> Petróleo y sus derivados (Gasóleos, Fuelóleos)</p> <p><b>Gaseosos</b> Gas natural, gas licuado de petróleo (GLP), Biogás</p>
	<b>Artificiales O Secundarios</b>	<p><b>Sólidos</b> Coque (destilado de carbón de hulla), carbón vegetal (destilado de la madera a 250°C), biomasa residual (basura y residuos urbanos, estiércol, etc.)</p> <p><b>Líquidos</b> Alcoholes (destilados de la biomasa), aceites de nafta y benzol (destilados de petróleo)</p> <p><b>Gaseosos</b> Destilados de madera, de la hulla y de natas de petróleo, gas de Horno Alto, Gas de coquería.</p>
	<b>Combustibles especiales</b>	<p><b>Líquidos</b> H<sub>2</sub> líquido + O<sub>2</sub> líquido, kerosene + O<sub>2</sub> líquido, dimetilhidracina</p> <p><b>Sólidos</b> Perclorato amónico, pólvora</p>

Los combustibles más representativos por su aplicación son: gas natural, gases licuados del petróleo (GLP), gasóleo también denominado gasoil o diésel, carbón y la madera-biomasa.

El gas natural es una mezcla de gases, el 70% de su composición corresponde a metano ( $\text{CH}_4$ ), el 20% a nitrógeno y el 10% a etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ). En los gases licuados del petróleo (GLP) se encuentra principalmente los hidrocarburos: propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )

Los Gasóleos pertenecen a la categoría de destilados puros, están compuestos por una gama de hidrocarburos comprendidos entre  $\text{C}_{14}$  y  $\text{C}_{20}$ .

La cualidad energética y valoración comercial de un combustible está relacionada con su composición, se puede diferenciar los distintos combustibles a partir de su poder calorífico. En el **ANEXO 1** se incluyen valores.

#### **CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES:**

- *Poder Calorífico.*- Es la energía por unidad de masa de combustible que se libera en la combustión.
- *Poder Calorífico Superior PCS,* se establece cuando la totalidad de agua contenida en los gases de combustión reside en estado líquido. Contiene el calor de condensación de agua.
- *Poder calorífico Inferior PCI,* se establece cuando la totalidad de agua contenida en los gases de combustión reside en estado gaseoso. No contiene el calor de condensación.
- *Poder Combustivo.*- Masa de aire necesaria para producir una combustión estequiométrica de un kilogramo de combustible.
- *Poder fumífero.*- Masa de humos secos producto de la combustión estequiométrica de un kilogramo de combustible.
- *Límites De Inflamabilidad (Inferior / Superior) (Li / Ls).*- Valores mínimo y máximo del porcentaje de combustible en la reacción para los que se produce combustión. Si el porcentaje de combustible es mayor que Ls, el exceso de combustible no permite la combustión. Si el porcentaje de combustible es menor a Li, la falta de combustible no permite la combustión.

### 1.3.3 EL AIRE COMO COMBURENTE

El aire circula en un caldero como muestra la **Figura 1.11**:

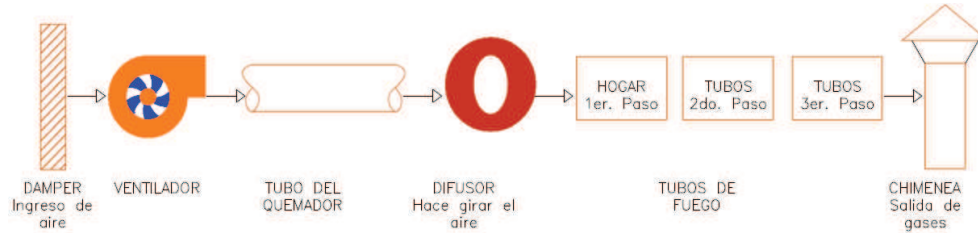


Figura 1.11. Flujo de Aire para la combustión [11]

Como se mencionó anteriormente, el oxígeno de combustión se obtiene del aire; el aire es una mezcla de oxígeno y nitrógeno principalmente. En los cálculos se considera la siguiente composición del aire seco: en volumen, 20,95% de oxígeno y 79,05% de gases inertes; en peso: 23,15% de oxígeno y 76,85% de gases inertes. Se obtiene entonces, que por cada unidad de oxígeno existente en la combustión se necesitarán  $100/20,95 = 4,77$  unidades de aire en volumen, o  $100/23,15 = 4,32$  unidades de aire en peso.

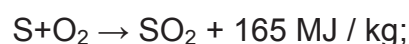
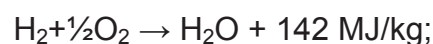
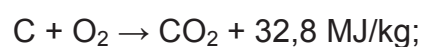
El nitrógeno al ser un gas inerte se considera que no tiene reacciones durante la combustión, pero cuando se expone a temperaturas mayores a 1.000 °C, forma óxidos de nitrógeno NOx.

Se considera que a condiciones estándar (1 bar ó 101,325 kPa a nivel del mar), temperatura 273°K (0 °C), 1 kg mol de un gas ocupa 22,41 m<sup>3</sup>. La variación de temperatura y volumen se obtienen según la ecuación:  $V=22,41 \cdot T/273,15$ .

Tabla 1.3. Variación del volumen de un gas ideal con la temperatura [9]

Temperatura	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
Volumen	22,41 m <sup>3</sup>	22,81 m <sup>3</sup>	23,22 m <sup>3</sup>	23,63 m <sup>3</sup>	24,04 m <sup>3</sup>	24,45 m <sup>3</sup>

En una combustión estequiométrica, las principales reacciones químicas que se producen son:



A partir de dichas ecuaciones se puede determinar la cantidad de oxígeno necesaria para que se desarrolle una combustión completa o cuantificar el impacto ambiental según el CO<sub>2</sub> producido en la combustión. Los cálculos de combustión en combustibles sólidos y líquidos se realiza empleando las masas, en cambio para los combustibles gaseosos se suele emplear los volúmenes. Así por ejemplo, en la **Ecuación 1- 4**:

$$1 \text{ mol de C} = 12 \text{ g} \rightarrow \frac{1}{2} \text{ mol de O}_2 = 16 \text{ g}$$

$$1 \text{ Kg C} \rightarrow x \text{ Kg O}_2 \quad \therefore x = 1,33 \text{ Kg de O}_2 \text{ y } 1,33 \cdot 4,32 = 5,75 \text{ kg de Aire}$$

El oxígeno y aire necesarios para que se produzca la combustión estequiométrica de algunos combustibles se presentan en la **Tabla 1.4**:

Tabla 1.4. Oxígeno y Aire necesarios en una Combustión Estequiométrica [9]

Sustancia	Reacción	Relaciones Estequiométricas			
		En peso <sup>i</sup>		En Volumen <sup>ii</sup>	
		Oxígeno	Aire	Oxígeno	Aire
Carbono	$\text{C} + 0,5 \text{ O}_2 \rightarrow \text{CO}$	1,33	5,75	<sup>iii</sup>	<sup>iii</sup>
Carbono	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	2,66	11,51	<sup>iii</sup>	<sup>iii</sup>
Hidrógeno	$\text{H}_2 + 0,5 \text{ O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	7,94	34,30	0,50	2,39
Metano	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	3,99	17,24	2,00	9,57
Etano	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	3,72	16,07	3,50	16,75
Propano	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	3,63	15,68	5,00	23,95
Butano	$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	3,58	15,46	6,50	31,14
Acetileno	$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	3,07	13,26	2,50	11,96
Azufre	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	1,00	4,32	<sup>iii</sup>	<sup>iii</sup>
Azufre	$\text{S} + 1,5 \text{ O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$	1,50	6,48	<sup>iii</sup>	<sup>iii</sup>

**1.3.3.1 Aire Estequiométrico:** “Es la cantidad exacta de aire que hace falta para conseguir una combustión completa.” [9]

Los componentes de un combustible generalmente son: carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno; en las reacciones anteriores se puede determinar el oxígeno necesario para una combustión estequiométrica, es importante considerar el

<sup>i</sup> kg de comburente por kg de combustible

<sup>ii</sup> m<sup>3</sup> de comburente por m<sup>3</sup> de combustible

<sup>iii</sup> El combustible a condiciones establecidas se encuentra en estado sólido

contenido de oxígeno en el combustible ya que también participa en la reacción. Se identifica la composición en peso del combustible por ser un combustible líquido (diesel), se determina la masa de oxígeno y aire requeridos:

Masa de Oxígeno requerido:

$$m_{O_2} = 32 \cdot (C/12 + H/4 + S/32 - O^i / 32) \quad [\text{kg/kg Combustible}] \quad \text{Ecuación 1-6}$$

Masa de Aire seco requerido:

$$m_{as} = 32 \cdot 4,32 \cdot (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) \quad [\text{kg/kg Combustible}] \quad \text{Ecuación 1-7}$$

Masa Aire húmedo requerido:

$$m_{ah} = m_{as} + (m_{as} \cdot w) \quad [\text{kg/kg Combustible}] \quad \text{Ecuación 1-8}$$

Donde  $w$  es la humedad específica del aire en [kg/kg] de aire seco

También se puede expresar como volumen; considerando que 18 [kg] de  $H_2O$  ocupan 22,4 [Nm<sup>3</sup>], debido a que 1 mol ocupa 22,4 [litros] a condiciones normales (18g $H_2O$ =0.224 l), así:

Volumen de aire seco requerido:

$$V_{as} = 22,4 \cdot 4,77 \cdot (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) \quad [\text{Nm}^3/\text{kg combustible}] \quad \text{Ecuación 1-9}$$

Volumen de aire húmedo requerido:

$$V_{ah} = V_{as} + 1,244 \cdot m_{as} \cdot w \quad [\text{Nm}^3/\text{kg combustible}] \quad \text{Ecuación 1-10}$$

La cantidad de gases producto de la combustión, se puede determinar a partir de la reacción cuantitativa de los componentes. Se determinan en masa o volumen.

$$\text{Masa de } CO_2 = \frac{44 \text{ kg de } CO_2}{12 \text{ kg de } C} = 3,67 C \frac{\text{kg} - C}{\text{kg} - Com}$$

Es decir: por cada kg de carbono contenido en un combustible se expulsarán 3,67 kg de  $CO_2$  a la atmósfera.

$$\text{Volumen de } CO_2 = \frac{22,4 \text{ Nm}^3 \text{ de } CO_2}{12 \text{ kg de } C} = 1,87 C \frac{\text{Nm}^3 - CO_2}{\text{Kg} - Comb}$$

La **Tabla 1.5** presenta la composición química de los gases de salida:

---

<sup>i</sup> Oxígeno contenido en el combustible



Tabla 1.5. Contenido químico en gases de salida [9]

Compuesto	Masa expulsada	Volumen expulsado
CO <sub>2</sub>	3,67 C	1,87 C
SO <sub>2</sub>	2 S	0,7 S
N <sub>2</sub>	N	0,8 N

La suma de los productos de la combustión estequiométrica, permite determinar la masa total de gases producidos, incluye también el nitrógeno contenido en el aire de combustión que se ha separado del oxígeno.

$$M_{gc} = \underbrace{3,67C + 2S + N}_{\text{Compuestos}} + \underbrace{\left(\frac{76,85}{23,15}\right) \cdot 32 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32}\right)}_{\text{Nitrógeno introducido en aire}} \frac{\text{kg-gases}}{\text{kg de combustible}} \quad \text{Ecuación 1-11}$$

En volumen se expresa:

$$V_{gc} = \underbrace{1,87C + 0,7S + 0,8N}_{\text{Compuestos}} + \underbrace{\left(\frac{79,05}{20,95}\right) \cdot 22,4 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32}\right)}_{\text{Nitrógeno introducido en aire}} \frac{\text{Nm}^3\text{-gases}}{\text{kg de comb.}} \quad \text{Ecuación 1-12}$$

El exceso de aire se puede determinar relacionando la masa real o volumen real por unidad de combustible de los gases producidos con la masa o volumen estequiométrico, como se indica:

$$M_{gcr} = M_{gc} + M_{as} \cdot (n-1); \text{ masa real de los gases.} \quad \text{Ecuación 1-13}$$

$$V_{gcr} = V_{gc} + V_{as} \cdot (n-1); \text{ volumen real de los gases.} \quad \text{Ecuación 1-14}$$

Si se considera el volumen de gases húmedos, se debe tomar en cuenta el vapor de agua contenido; así se tiene:

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{18} \frac{\text{Nm}^3\text{-H}_2\text{O}}{\text{kg de combustible}} \quad \text{Ecuación 1-15}$$

Si únicamente se proporciona el aire teórico calculado, la reacción no podría realizarse por falta de tiempo, originando reacciones incompletas. Se debe pensar que el combustible en un caldero inicialmente debe romperse molecularmente (romper enlaces entre sus diferentes átomos). Para esto se necesita energía (llama inicial) y tiempo, por esto se explica la dificultad relativa para quemar un fuelóleo ante un gas natural.

El monóxido de carbono es un elemento muy representativo de una reacción incompleta **Ecuación 1-2**; una fracción de energía calorífica de combustión no se desprende en el interior del caldero y se expulsa como monóxido de carbono, se entiende entonces la pérdida energética generada al comparar el calor de oxidación del CO con el del CO<sub>2</sub>.

En la combustión incompleta existe al menos un componente que no se ha oxidado totalmente, es decir no se obtiene el poder calorífico total del combustible, dichos productos se denominan inquemados.

El aire total o aire real de combustión es la suma del aire estequiométrico necesario y el exceso de aire.

Si se considera una mezcla incompleta; se debe tomar en cuenta la formación de CO:

$$V_{CO_2} = \frac{22,4 x}{12} C \frac{Nm^3 CO_2}{kg \text{ de combustible}} \quad \text{Ecuación 1-16}$$

$$V_{CO} = \frac{22,4 (1-x)}{12} C \frac{Nm^3 CO}{kg \text{ de combustible}} \quad \text{Ecuación 1-17}$$

Donde x representa la cantidad de carbono que forma CO<sub>2</sub> y (1-x) la cantidad que reacciona para formar CO.

### 1.3.4 EXCESO DE AIRE

“A la relación entre el aire realmente usado en la combustión y el aire teórico correspondiente al combustible se llama índice o coeficiente de exceso de aire, y se representa por n.” [12]

$$n = \frac{\text{Aire Real}}{\text{Aire Teórico}} > 1 \quad \text{Ecuación 1-18}$$

Al introducir un exceso de aire, se debe considerar que una parte de oxígeno no reaccionará y será expulsado con el resto de gases de combustión. Se define entonces un punto óptimo de exceso de aire para el rendimiento de combustión en un caldero, de este punto óptimo, si se disminuye el exceso de aire disminuye el rendimiento al producir combustión incompleta, por el contrario si el exceso de aire aumenta, disminuye también el rendimiento debido que parte del calor

producido en la combustión será absorbido por la cantidad adicional de aire ingresado.

El exceso de aire no depende completamente de la composición o naturaleza del combustible sino también del tipo de caldero (espacio de cámara), quemador (mezcla combustible/comburente), tiempo de permanencia, condiciones ambientales y temperatura de combustible. Por esto es importante determinar que para cada instalación el exceso de aire se establecerá a partir de un análisis de gases y el punto óptimo de funcionamiento será de uso particular para la unidad.

Algunos autores señalan que los rangos de exceso de aire para diferentes combustibles son:

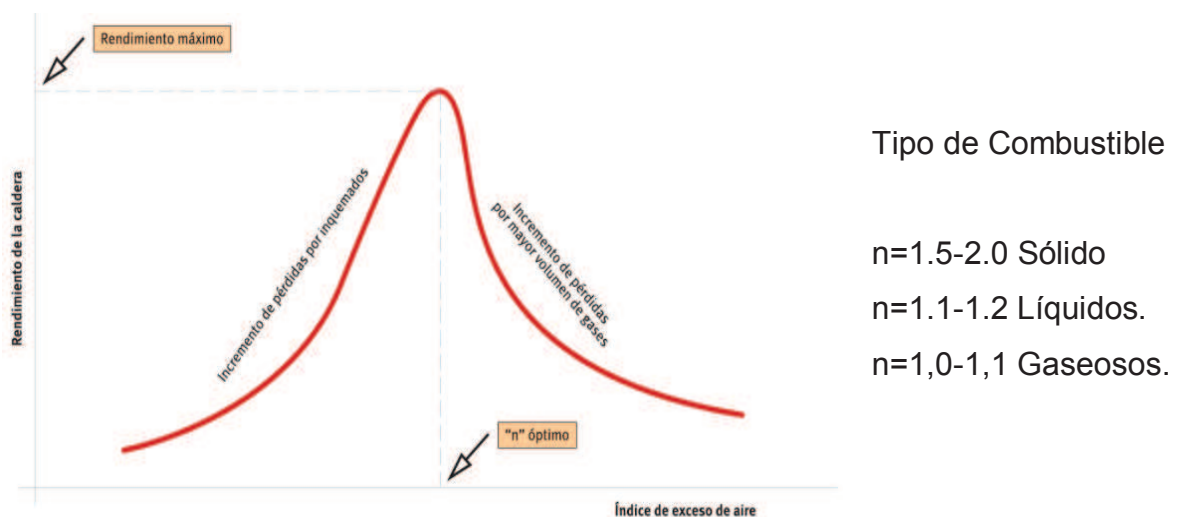


Figura 1.12. Rendimiento de un caldero en función del exceso de aire [9]

### 1.3.5 TIPOS DE COMBUSTIÓN

- Según los productos que se obtienen

- *Combustión con exceso de aire.*- La cantidad de aire es mayor al mínimo necesario, la combustión es completa, no se producen inquemados.

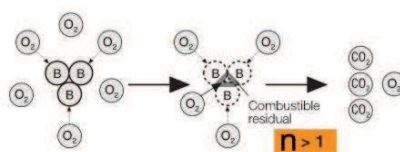


Figura 1.13. Combustión con exceso de aire [12]

- *Combustión con defecto de aire.*- La cantidad de aire es menor que la cantidad de aire mínimo necesario. Se producen combustiones incompletas (inquemados).
- *Combustión completa.*- Se establece un exceso de aire controlado y el combustible se oxida completamente, se obtiene combustión completa.

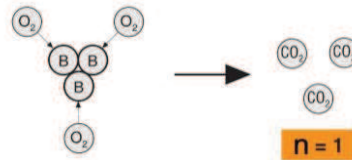


Figura 1.14. Combustión completa [12]

- *Combustión incompleta.*- Los gases de combustión contienen compuestos parcialmente oxidados, por tanto disminuye la cantidad de calor obtenida. Se establece con exceso o con defecto de aire. Como se indicó anteriormente, el más representativo es el CO. La reacción se realiza cuando una parte “a” del carbono del combustible pasa a CO<sub>2</sub> y el resto “1 - a” a CO:



**Según su desarrollo** Ref. [13]

- *Combustión generalizada o autoencendido.*- Cuando todo el volumen diferencial se encuentra en las mismas condiciones y en un instante determinado se produce el inicio de la combustión (autoencendido), debido a ciertas condiciones de la mezcla no originadas por una agente exterior. La fase final es rápida y puede dar lugar a explosiones (explosión). Sin chispa, las propiedades de la mezcla producen la combustión.
- *Combustión localizada.*- Las condiciones de presión y temperatura son diferentes en los diversos puntos del volumen. Para su generación necesita una fuerza externa (ignición) y aparece un frente de llama que progresa. Necesita chispa de encendido.
- *Combustión localizada con discontinuidad de presión.*- Procesos de combustión muy rápidos (aproximadamente la velocidad del sonido). Se genera una onda de choque que produce una discontinuidad de presión (Detonación).

- *Combustión localizada con discontinuidad de temperatura.*- La velocidad de combustión es mucho menor que la del sonido; además, existe una discontinuidad de temperatura localizada en el frente de llama, mantenida por la energía liberada en el proceso. Llamado deflagración.

#### 1.4 FORMACIÓN DE CONTAMINANTES

“Los procesos de combustión dan lugar, inevitablemente, a la inmisión en la atmósfera de sustancias que modifican la composición y que tienen un poder contaminante sobre el aire, la tierra y el agua.” Ref. [12]

La naturaleza y concentración de sustancias contaminantes dependen de: tipo de combustible, tipo de caldero, quemador, mantenimiento y regulación de la instalación.

Inherente al proceso de combustión, se encuentra la formación de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y vapor de agua  $\text{H}_2\text{O}$ ; el primero tiene un elevado potencial de impacto ambiental, el segundo es considerable al condensarse y formar compuestos especialmente con el nitrógeno. Encontramos también productos de una combustión incompleta (Inquemados), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y otras emisiones debido a contaminantes contenidos en el combustible tales como óxidos de azufre, cenizas y trazas de sustancias varias. En la **Figura 1.15** se muestra la formación de gases en función del exceso de aire:

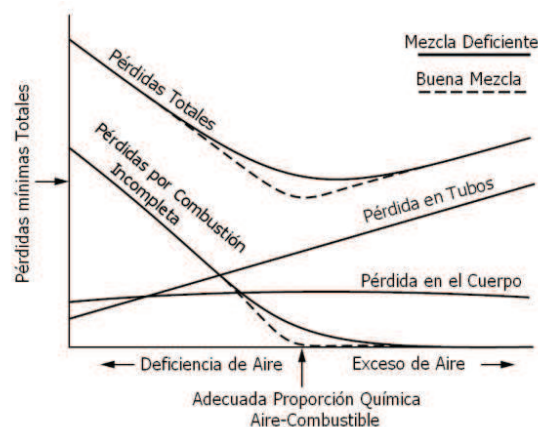


Figura 1.15. Composición de humos en función del exceso de aire [12]

### 1.4.1 UNIDADES DE MEDICIÓN DE LOS GASES

Los componentes de gases de combustión se determinan en las siguientes unidades:

#### Ppm (Partes Por Millón)

La unidad representa el número de partes que constituye una determinada sustancia en un millón de partes del compuesto. Es independiente de la presión y la temperatura, se utiliza en concentraciones bajas. Para concentraciones mayores, se utiliza el porcentaje (%). La equivalencia es: 10.000 ppm = 1 % ó 1 ppm = 0,0001 %.

#### mg/Nm<sup>3</sup> (miligramos por metro cúbico a condiciones Normales)

Toma como referencia el volumen en m<sup>3</sup> a condiciones normales y la masa del gas se indica en miligramos (mg/Nm<sup>3</sup>), varía con la presión y la temperatura. Las condiciones normales son: Presión = 1 atm = 1013 mbar (HPa) y Temperatura = 0°C.

La fórmula para convertir mg/Nm<sup>3</sup> a ppm de un contaminante gaseoso es:

$$\text{mg/Nm}^3 = \text{ppm} \times \text{Peso Molecular del gas} \times 0,0409 \quad [14] \quad \text{Ecuación 1-21}$$

Para realizar la conversión, con cierta aproximación, en diferentes condiciones de presión y temperatura, se considera el comportamiento ideal del gas y en un mol se tiene [15]:

$$\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} = \frac{\text{ppm}}{10^{-6}} \times \frac{\text{Peso Molecular del gas}}{\frac{nRT}{P}} = \frac{\text{ppm}}{10^{-6}} \times \frac{\text{Peso Molecular del gas}}{\frac{RT}{P}} \quad \text{Ecuación 1-22}$$

$$R = 0,08206 \frac{\text{l} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

T = temperatura en grados K

P = Presión en atmósferas

La **Ecuación 1- 21** y **Ecuación 1- 22**, se refieren a un volumen que contiene una sustancia no diluida. Al considerar como referencia el volumen de gas no se

puede despreciar la cantidad de oxígeno contenido en dicho volumen, las transformaciones se hacen en función del oxígeno contenido de referencia.

### **mg/kWh (miligramos por kilovatio-hora de energía)**

Esta unidad indica las concentraciones de gas que reaccionan con una unidad de energía [mg/kWh]. Previamente los valores medidos en concentraciones de emisión deben convertirse en gases de combustión no diluidos (0% de oxígeno de referencia).

Tabla 1.6. Factores de conversión para las unidades relacionadas a la energía [9]

<b>GASÓLEO</b>		
<b>CO</b>	1 ppm = 1,110 mg/KWh 1mg/m <sup>3</sup> = 0,889 mg/KWh	1mg/KWh = 0,900 ppm 1mg/KWh = 1,125 mg/m <sup>3</sup>
<b>NOx</b>	1 ppm = 1,822 mg/KWh 1mg/m <sup>3</sup> = 0,889 mg/KWh	1mg/KWh = 0,549 ppm 1mg/KWh = 1,125 mg/m <sup>3</sup>
<b>GAS NATURAL H (G20)</b>		
<b>CO</b>	1 ppm = 1,074 mg/KWh 1mg/m <sup>3</sup> = 0,859 mg/KWh	1mg/KWh = 0,931 ppm 1mg/KWh = 1,164 mg/m <sup>3</sup>
<b>NOx</b>	1 ppm = 1,759 mg/KWh 1mg/m <sup>3</sup> = 0,859 mg/KWh	1mg/KWh = 0,569 ppm 1mg/KWh = 1,164 mg/m <sup>3</sup>

## **1.4.2 COMPONENTES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN [12]**

- **Inquemados**

En las reacciones de combustión incompletas, los gases de combustión contienen las sustancias: carbono puro (hollín), monóxido de carbono e hidrocarburos (HC). Se identifican dos tipo de quemados: sólidos y gaseosos.

- *Inquemados sólidos.*- Se producen únicamente a partir de combustibles sólidos o líquidos. Su constitución contiene partículas de carbono e hidrocarburos fraccionados. Se producen por:

Mal funcionamiento del quemador: no existe uniformidad de mezcla aire/combustible, deficiente atomización del combustible, inadecuada intensidad

de fuego y dimensión de llama para la cámara de combustión, la viscosidad del combustible líquido es incorrecta, aire de combustión insuficiente.

Se manifiesta por la acumulación de hollín en los conductos de humo y la aparición de humos oscuros en la chimenea. Produce dos efectos perjudiciales: pérdida de potencia calorífica del combustible y depósito de hollín en las superficies de intercambio térmico del caldero, disminuye el intercambio de calor en los tubos y provoca un aumento en la temperatura de humos. La acumulación de hollín se mide según el nivel de opacidad, su valor típico en un caldero de gasoil es de 0 ó 1.

- *Inquemados gaseosos.*- Constituidos por CO e hidrocarburos ligeros principalmente. Se forman por: aire de combustión insuficiente, mal funcionamiento del quemador.

### **Nitrógeno (N<sub>2</sub>)**

Entra en el caldero como parte del aire de combustión, se calienta y sale por la chimenea. Los valores típicos en los gases de combustión en calderos gasoil/gas son del 78 % - 80 %.

### **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

El anhídrido carbónico CO<sub>2</sub> es el resultado de una combustión completa del carbono.

### **Vapor de agua (humedad)**

El combustible contiene Hidrógeno que al combinarse con el oxígeno, forma agua (H<sub>2</sub>O). El agua sale, según la temperatura de los gases (TH), como humedad del gas de combustión o como condensado.

### **Oxígeno (O<sub>2</sub>)**

El oxígeno que no reacciona en la combustión cuando se utiliza exceso de aire está presente en los gases de combustión, es útil para determinar el rendimiento



de la combustión. Los valores típicos en los gases de combustión en calderos de gasoil son del 2% - 5%.

### **Monóxido de carbono (CO)**

Producto de una combustión incompleta, se forma CO, en el aire se transforma en dióxido de carbono CO<sub>2</sub>. Además se ha visto anteriormente el desperdicio energético que representa la producción de CO.

### **Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

“La formación de los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, obtenidos por la combinación de los compuestos presentes en el aire, es una función exponencial de la temperatura que se alcanza en la cámara de combustión, del tiempo de permanencia de los humos en esa zona y del porcentaje de oxígeno presente en la misma.” [12]

### **Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y punto de rocío Ácido**

El azufre contenido por el combustible se oxida y forma SO<sub>2</sub>, en las mismas condiciones al incrementar la temperatura, forma SO<sub>3</sub> que al reaccionar con vapor de agua y enfriarse por debajo de su punto de rocío, se condensa a ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) lo que produce corrosión en las superficies más frías de la caldera. A continuación, se indican valores de temperaturas de puntos de rocío de gas y gasoil, en función del exceso de aire:

Tabla 1.7. Puntos de Rocío Ácido en dos combustibles [9]

	Exceso de Aire %				
	0	25	50	75	100
Gasóleo	50 °C	47 °C	44 °C	41 °C	39 °C
Gas Natural	60 °C	56 °C	53 °C	50 °C	48 °C

### **Partículas sólidas**

“Las partículas sólidas (polvo) es el nombre que se da a pequeñas partículas sólidas distribuidas en el aire. Esto puede ocurrir en cualquier forma y densidad.

Se forman a partir de las cenizas y de los minerales que componen los combustibles sólidos.” [13]

## 1.5 MÉTODOS DE CONTROL

Los controles de combustión de calderos se basan en los siguientes arreglos:

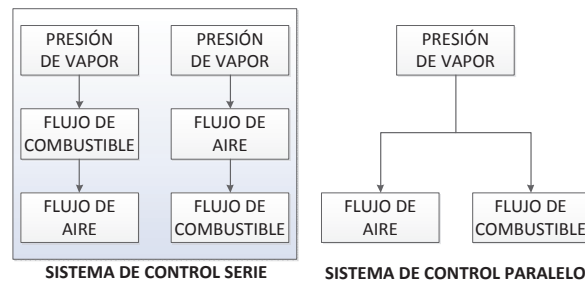


Figura 1.16. Esquemas de control de Calderos [2]

### 1.5.1 CONTROL MECÁNICO

La variable primaria a controlar es la presión de vapor, la cual es medida por un presostato modulante. La señal posiciona eléctricamente el motor que acciona directamente una válvula de combustible. El motor acciona paralelamente una leva mecánica que mueve el corta tiros de regulación del aire de combustión. La leva se regula para mantener constante la relación aire-combustible a las diferentes marchas del caldero.

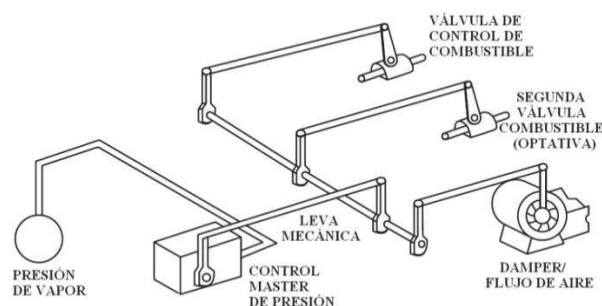


Figura 1.17. Control mecánico de un caldero [13]

### 1.5.2 CONTROL NEUMÁTICO DIRECTO

La variable a controlar es la presión del vapor y el sistema mecánico anterior ha sido sustituido por un sistema neumático. Tanto este sistema como el anterior funcionan teniendo en cuenta algunas condiciones de combustión impuestas, es

decir, una relación aire/combustible prefijadas. Aparecen desequilibrios en la combustión prefijada, produciéndose oscuridad de humos e inquemados.

### 1.5.3 CONTROL DE MEDIDA EN SERIE

La presión de vapor actúa posicionando la válvula de entrada del combustible. El caudal de combustible medido posiciona el corta tiros de regulación del aire comburente a través de una estación manual de relación aire-combustible. Podemos mejorar el sistema introduciendo las medidas de caudal de combustible y aire comburente, que actúan como amortiguamiento del sistema. Al principio actúa sobre el combustible, lo que implica una existencia de un desfase en determinados momentos o prolongados que significa un mayor consumo no justificado.

### 1.5.4 CONTROL DE MEDIDA EN PARALELO

El aire y el combustible responden simultáneamente a las variaciones de la carga, por tanto, se reducen los periodos transitorios.

### 1.5.5 CONTROL DE MEDIDA EN PARALELO CON LÍMITES CRUZADOS

El sistema hace que siempre se disponga de aire en exceso para la combustión ya que cuando aumenta la carga, aumenta primero el caudal de aire y luego el caudal de combustible y cuando disminuye la carga, se reduce primero el combustible y después el aire.

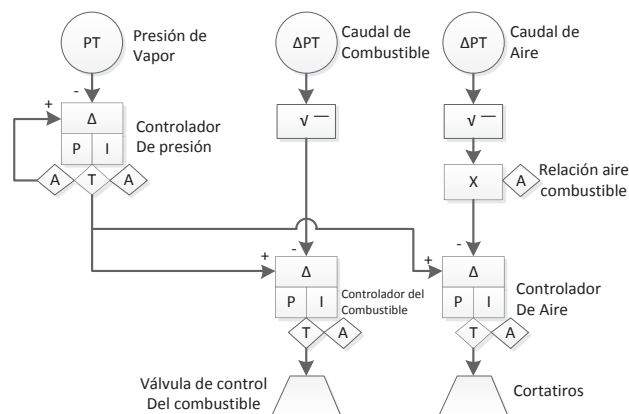


Figura 1.18. Lazo de Control en paralelo con límites cruzados [13]

## 1.6 TIPOS DE CONTROL CON CORRECCIÓN POR MEDIDA

Este tipo de control incorpora un sistema adicional para mejorar el control, a partir de la corrección de la relación aire/combustible. Esta corrección se basa en la medida de algunos parámetros.

Tabla 1.8. Métodos de análisis de gases de combustión [13]

Componente Método de medida	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	Inquemados solidos
Precipitación con Ba(OH) <sub>2</sub>	X			
Conductividad eléctrica	X			
Calorímetro con hidracina	X			
Absorción química	X	X	X	
Conductividad térmica	X			
Infrarrojos dispersivos			X	
Infrarrojos no dispersivos	X		X	
Paramagnéticos		X		
Sonda de óxido de zirconio		X		
Membrana semipermeable		X		
Calorimétrico con I <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			X	
Oxidación con HgO			X	
Combustión catalítica			X	
Índice de ennegrecimiento				X
Opacimetría				X
Gravimetría				X
Absorción de rayos				X
Difusión de la luz				X
Carga electrostática				X
Vibración de cuarzo piezoeléctrico				X

### 1.6.1 CORRECCIÓN POR MEDIDA DE O<sub>2</sub>

El sistema trabaja modificando la relación aire/combustible fijada manualmente. Para ello fija un nivel de oxígeno óptimo en los gases y, el controlador de oxígeno compara el valor medido del gas con el nivel que hemos fijado anteriormente, de tal manera que va añadiendo o quitando aire para ajustarse al objetivo. Cuando se desea un rendimiento máximo, la única medida del oxígeno provoca una incertidumbre demasiado grande. Un control sobre el oxígeno no asegura necesariamente un control sobre las emisiones de CO e hidrocarburos. El lazo de control se muestra a continuación:

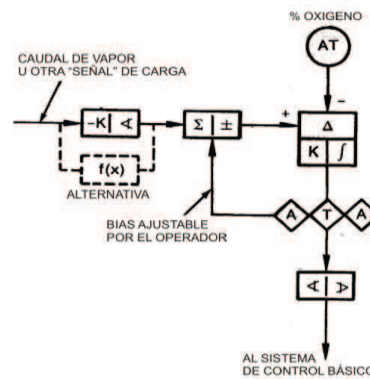


Figura 1.19. Lazo de Control de %O<sub>2</sub> [16]

### 1.6.2 CONTROL POR MEDIDA DE CO<sub>2</sub>

No es una buena base para optimizar porque su relación con el exceso de oxígeno es función del tipo de combustible utilizado, además es poco sensible en el punto de exceso de combustible óptimo debido a que el CO<sub>2</sub> se encuentra en su máximo.

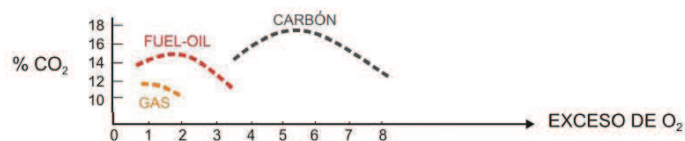


Figura 1.20. Relación entre exceso de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en la salida de un caldero operado a carga cte. [17]

### 1.6.3 CONTROL POR MEDIDA DEL CO

El CO es un indicador muy sensible de un quemador mal ajustado, si su concentración sube hasta 1000 ppm es una indicación muy fiable de condición de trabajo insegura.

Teóricamente el CO debería ser cero con presencia del O<sub>2</sub> en el gas de combustión, pero en la práctica, en calderos de gran tamaño no es así, se puede mantener un rendimiento máximo cuando el CO se encuentra entre 100 y 200 ppm. El esquema de control a partir de las emisiones de CO y combinado (CO, CO<sub>2</sub>), se observan en la **Figura 1.22**. Estructuras de Control . Las concentraciones de CO que se obtienen a la salida de un caldero de gran tamaño se muestran en la **Figura 1.21**.

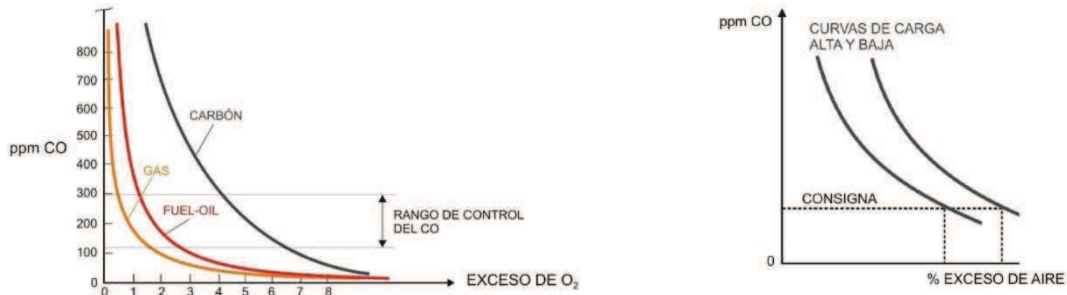


Figura 1.21. Concentración de CO y curvas de carga [16]

En la **Figura 1.22**, en líneas continuas se puede ver el control básico, y en línea discontinua lo que se debe añadir para operar en el punto de pérdidas mínimas por combustible en el control por CO. Además se puede implementar un sistema de control combinado entre CO y O<sub>2</sub> en cascada.

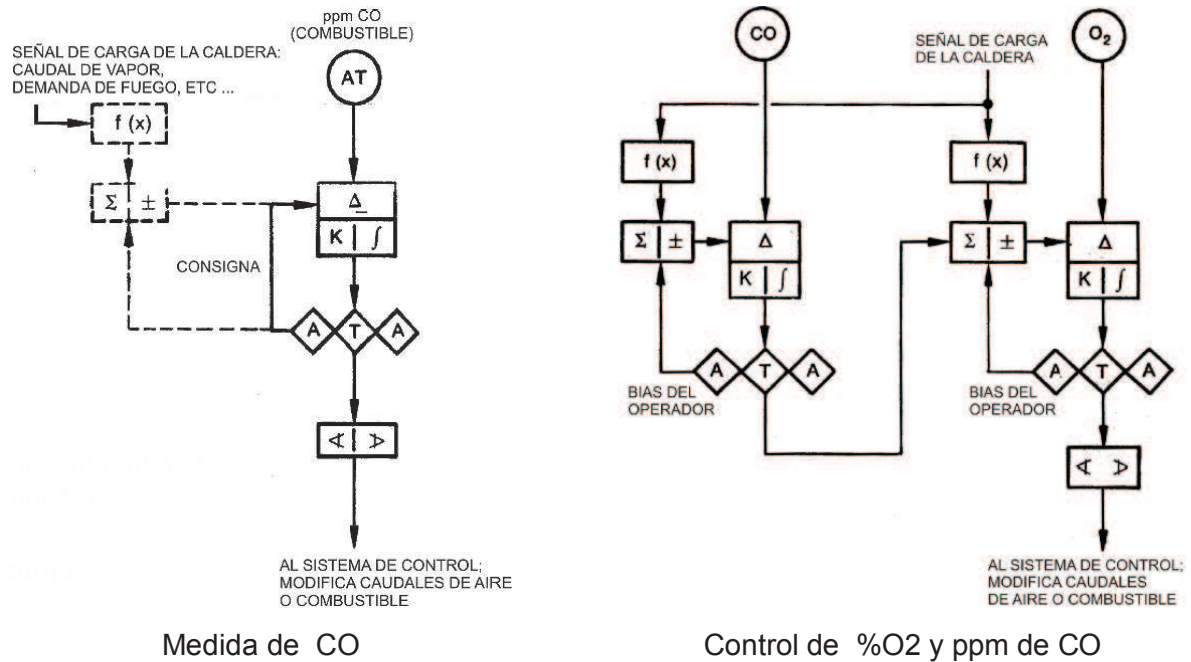


Figura 1.22. Estructuras de Control [16]

### 1.6.4 CORRECCIÓN POR MEDIDA DE LAS PÉRDIDAS

Se relaciona directamente con el rendimiento, considerando las pérdidas que se producen, se debe conseguir minimizar el valor de pérdidas a cada instante de funcionamiento.

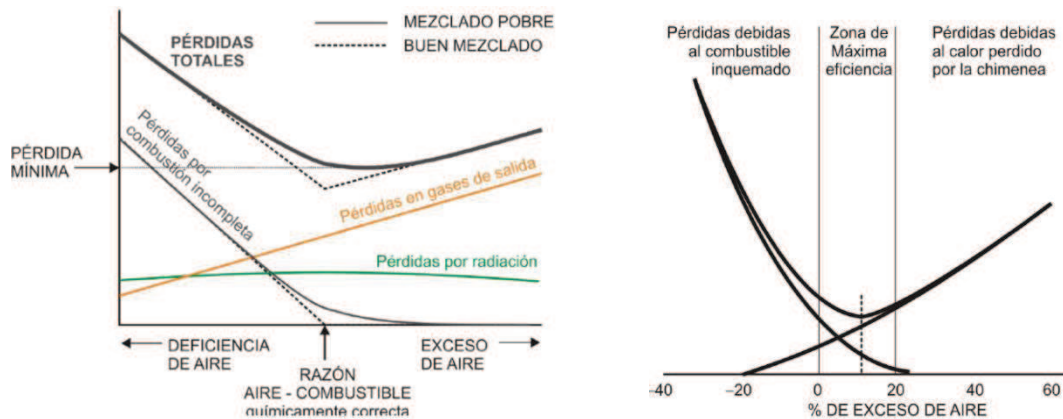


Figura 1.23. Pérdidas en función del exceso de aire [17]

## 1.7 EQUIPO PARA AHORRO DE ENERGÍA

Este equipo aumenta la eficiencia por recuperación del calor de los gases de escape antes de que salgan por la chimenea.

El equipo de recuperación consiste esencialmente en intercambiadores de calor, su instalación depende del tamaño del caldero, temperatura de los gases de escape y de un análisis de costos. El equipo considera: sobrecalentadores, que elevan la temperatura del vapor sobre la temperatura de saturación; economizadores, que utilizan el calor recuperado de los gases para precalentar el agua de alimentación y calentadores de aire de suministro para la combustión. La

Figura 1.24 muestra dichos equipos:

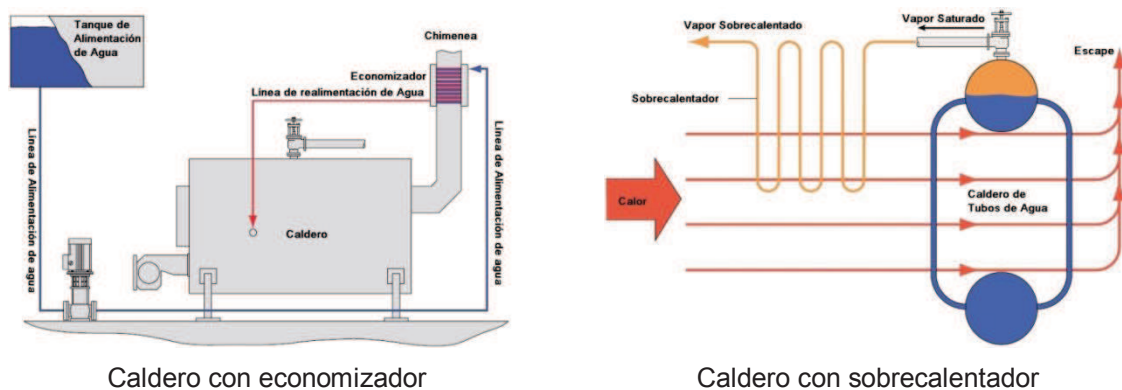


Figura 1.24. Equipo de ahorro energético [7]

## 1.8 RENDIMIENTO EN UN CALDERO

Al analizar el rendimiento en un caldero se deben tener en cuenta el balance de energía, así se tiene un circuito que compone el flujo de combustible que se

introduce, reacciona en la cámara de combustión, produce calor y humos que escapan por la chimenea; y el otro circuito que se refiere al flujo de agua que circula por el caldero y absorbe el calor de la combustión. Así el rendimiento energético de este proceso será la relación entre el calor que ha captado el agua (calor útil) respecto al que poseía el combustible utilizado. Se presentan dos formas para determinarlo:

### 1.8.1 Método Directo

Se determina midiendo el calor contenido en el agua antes y después del caldero, se determina la energía del combustible. Este método obliga a medir el caudal de agua que circula por el caldero y su temperatura a la entrada y salida. El rendimiento viene definido por:

$$\eta = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{F \cdot PCI} \quad \text{Ecuación 1-23}$$

$\eta$ : rendimiento (%)

$m$ : Caudal de agua en el caldero  $\left(\frac{kg}{s}\right)$

$c_p$ : Calor específico del agua  $\left(\frac{KJ}{kg \cdot ^\circ C}\right)$

$\Delta T$ :  $T_s - T_e = \text{Temp. Agua salida}(^\circ C) - \text{Temp. Agua entrada}(^\circ C)$

$F$ : Consumo de combustible  $\left(\frac{kg}{h}\right)$

$PCI$ : Poder calorífico inferior del combustible  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$

### 1.8.2 MÉTODO INDIRECTO

Se obtiene calculando las pérdidas de energía, así tenemos:

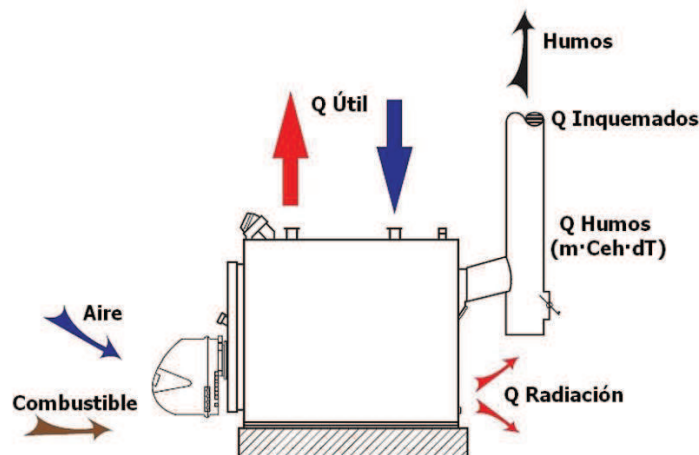


Figura 1.25. Factores que inciden en la pérdida de energía [10]



- **Pérdidas en el cuerpo del caldero.-** Se dan por conducción que se producen en los apoyos del caldero y no se los toma en cuenta por su escasa entidad, convección y radiación que se producen en la envolvente del caldero y depende de las temperaturas de agua contenida y del ambiente externo. El valor de estas pérdidas se calcula vía experimental, a una temperatura constante de 80°C, en calderos estándar fluctúa entre 1,5 y 5% y en calderos de baja temperatura y condensación entre un 0,5 y 2%, el valor de estas pérdidas es inversamente proporcional a la potencia de la caldera.
- **Pérdidas de calor sensible en humos.-** “Estas pérdidas dependen de: la diferencia de temperatura entre humos y aire comburente, calor específico de los humos y el exceso de aire empleado en la combustión. Estas pérdidas suelen estar comprendidas entre el 6 y el 10% de la potencia nominal, incrementándose notablemente en caso de mantenimiento deficiente” [12]. El cálculo de estas pérdidas puede efectuarse:

$$P_h = \frac{m \cdot c_{pm} \cdot \Delta T}{F \cdot PCI} \quad P_h = \frac{v \cdot c_{pv} \cdot \Delta T}{F \cdot PCI} \quad \text{Ecuación 1-24}$$

$P_h$ : Pérdidas en humos (%)

$m$ : Caudal másico de los humos  $\left(\frac{kg}{s}\right)$

$v$ : Caudal en Volumen de los humos  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$c_{pm}$ : Calor específico de los humos  $\left(\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}\right)$

$c_{pv}$ : Calor específico de los humos  $\left(\frac{kJ}{m^3 \cdot ^\circ C}\right)$ ; en los anexos se incluyen los valores para gases.

$\Delta T_h = T_h - T_a = \text{Temp. Humos salida } (^\circ C) - \text{Temp. Humos en la sala } (^\circ C)$

$F$ : Consumo de combustible  $\left(\frac{kg}{h}\right)$

$PCI$ : Poder calorífico inferior del combustible  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$

- **Pérdidas por inquemados.-** Estas pérdidas son debidas a la presencia de monóxido de carbono CO en los gases, si la combustión es correcta, son muy pequeñas. Un valor referencial es 0,5% de la potencia útil de la caldera con combustibles gaseosos. Se determinan a partir de:

$$P_i = \frac{PCCO}{PCI} \cdot CO \quad \text{Ecuación 1-25}$$

*CO: es el contenido de Monóxido de carbono (%)*

*PCCO: Es el poder calorífico del Monóxido de carbono*

*PCI: es el poder calorífico del combustible*

Con todo ello, el rendimiento energético de la caldera vendrá definido por la expresión:

$$\eta = 100 - (Prad + conv + Ph + Pi) \quad \text{Ecuación 1-26}$$

debido a la dificultad para su determinación y su baja representación se pueden despreciar las pérdidas en el cuerpo del caldero, así el rendimiento estará dado por:

$$\eta = 100 - (Ph + Pi) \quad \text{Ecuación 1-27}$$

## 1.9 CALIDAD DE VAPOR

La calidad de vapor se define en función de su nivel de sequedad y se puede determinar a partir de dos métodos:

El primero, mediante la utilización de un calorímetro de separación, el cual separa la humedad del vapor que entra al calorímetro, posterior a ello se mide el peso de la humedad recogida en estado líquido y el peso del vapor seco que sale del calorímetro. La calidad de vapor ( $x$ ) está dada por:

$$x = \frac{m_{vs}}{m_{vs} - m_h} \quad \text{Ecuación 1-28}$$

*x: Calidad de vapor*

*$m_{vs}$ : Masa de vapor seco que pasa por el calorímetro (Kg)*

*$m_h$ : Masa de humedad contenida en el vapor que ingresó (Kg)*

En el segundo método se utiliza un calorímetro de estrangulación, se basa en que si el vapor se estrangula y luego se expande sin realizar trabajo es decir sin pérdidas de calor, la energía del vapor permanece constante, así en la expansión la humedad contenida se evaporará y debido a esto el vapor en el lado de baja

presión quedará recalentado a esta presión; la entalpía total del vapor se mantiene constante así pues: La entalpía total del vapor saturado húmedo antes de la expansión ( $h_f + xh_{fg}$ ) es igual a la entalpía total  $h$  del vapor recalentado después de la expansión.  $(h_f + xh_{fg}) = h$  . Por tanto:

$$x = \frac{h - h_f}{h_{fg}} \quad \text{Ecuación 1-29}$$

*x: Calidad de Vapor*

*$h_f$ : Entalpía del líquido a la presión absoluta inicial*

*$h_{fg}$ : Entalpía de vaporización a la presión absoluta inicial*

*h: Entalpía total del vapor recalentado a la presión absoluta del calorímetro*

## CAPÍTULO 2

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA INSTALADO

En este capítulo se presenta una descripción del sistema de generación y distribución de vapor del IESS Hospital de Ambato, los sistemas asociados a la producción de vapor. Se presenta cada una de las partes mecánicas que componen el caldero, se realiza un análisis del sistema de control instalado y finalmente el análisis funcional de sensores, terminales eléctricos que se utilizarán en el nuevo sistema de control.

#### 2.1 SISTEMA GENERADOR DE VAPOR

Para la generación de vapor, el Hospital dispone de tres calderos; éstos calderos tienen un sistema de control de combustión mecánico; el sistema comprende: una línea de distribución de vapor que se extiende hasta cada punto de consumo en el hospital y una línea de retorno de condensado que desemboca en el tanque de realimentación de agua para los calderos, de esta manera se precalienta el agua de alimentación obteniéndose las siguientes ventajas [2]:

- Se reduce las tensiones de las planchas y tubos de los calderos debido a una disminución en el choque térmico.
- Mayor utilización del calor del fluido de calentamiento, de otro modo serviría para compensar la temperatura precalentada.
- Purificación parcial de agua no tratada, por ejemplo con el uso de desgasificadores.
- Incremento del rendimiento del caldero.

La **Figura 2.1** muestra un diagrama del circuito cerrado de distribución de vapor, retorno de condensado, agua de reposición previamente ablandada y el tratamiento químico que se hace antes de ingresar al caldero.

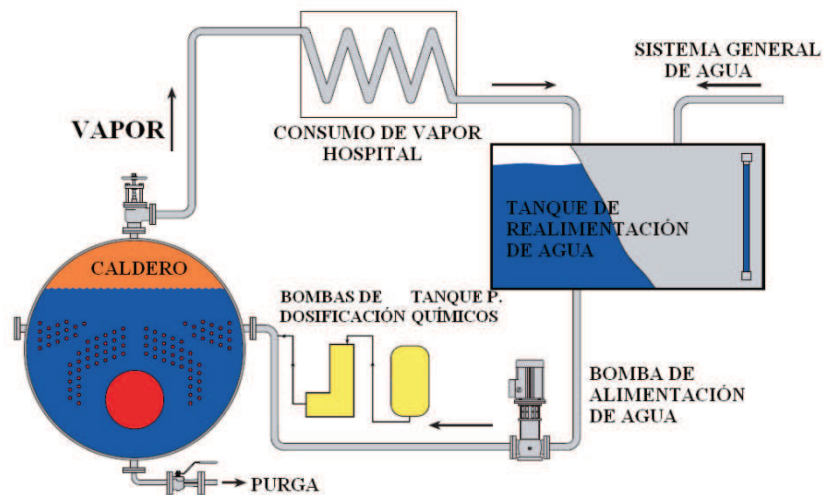


Figura 2.1. Sistema de generación y distribución de vapor, retorno de condensado, alimentación de agua hacia el caldero [7]

### 2.1.1 SUMINISTRO DE AGUA

**Tanque de realimentación de Agua.-** Provee una reserva de agua para cubrir con el abastecimiento de agua al caldero, generalmente de una hora a condiciones de funcionamiento normal del caldero; es decir, el caldero previo al corte de suministro de agua por el sistema general del Hospital no debería estar en un estado de paro total (desconectado).

El tanque de realimentación tiene dos fuentes de abastecimiento: el retorno de condensado de los procesos y una tubería desde el sistema de distribución de agua general del hospital que servirá para reemplazar las pérdidas de vapor en los procesos, distribución y purgas. Esta agua de reemplazo añadida al caldero se denomina “agua de reposición”.

**Alimentación de Agua.-** Una condición imprescindible en la operación de calderos, es mantener constante el nivel de agua; se suministra agua al caldero desde el tanque de realimentación con una bomba de agua de 150 GPM (**ANEXO 2**), el flujo bombeado es capaz de mantener constante el flujo de vapor producido más el flujo de agua de purga. La bomba alimentadora de agua es controlada directamente por un dispositivo Mc Donnell como veremos después, es un control ON/OFF; los niveles están calibrados según las recomendaciones del fabricante.

**Sistema de tratamiento de Agua.-** El agua del caldero está compuesto por el flujo total de retorno de condensado y el agua de reposición, de acuerdo a esto el tratamiento de agua se podría incluir al agua cruda, a los condensados o al agua del caldero.

La composición del agua varía de acuerdo a su origen, contiene cantidades variables de materia disuelta y suspendida. Los sólidos suspendidos son aquellos que no se disuelven en el agua (arena, arcillas, algunos óxidos metálicos) y pueden ser removidos por decantación, filtración o clarificación.

Los sólidos disueltos se encuentran en solución (sílice, hierro, calcio, magnesio, sodio); generalmente las incrustaciones se dan cuando los compuestos de calcio y magnesio en el agua (agua dura) se precipitan y adhieren a las superficies internas, estos compuestos son menos solubles cuando se incrementa la temperatura. Los elementos metálicos están presentes en combinaciones con radicales, bicarbonatos, sulfatos y cloruros.

El agua lluvia contiene en solución gases atmosféricos, en aguas de pozos se encuentran grandes cantidades de minerales disueltos y en aguas superficiales se encuentra frecuentemente materia orgánica.

Los principales parámetros involucrados en el tratamiento del agua de un caldero son:

El PH del agua representa las características ácidas o alcalinas del agua, al controlarlo evitamos problemas de corrosión (Bajo PH) y depósitos (Alto PH); la dureza cuantifica principalmente la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, los que favorecen a la formación de depósitos e incrustaciones; el oxígeno presente en el agua favorece a la corrosión de los componentes metálicos del caldero, la presión y temperatura aumentan la velocidad con la que se produce la corrosión; hierro y cobre forman depósitos que deterioran la transferencia de calor; dióxido de carbono, favorece también a la corrosión y su efecto puede ser más notable en las tuberías de retorno de condensado; el aceite favorece a la formación de espuma; el fosfato se usa para controlar el PH; secuestrantes de oxígeno, usados para remover el oxígeno residual del agua; el sílice puede formar incrustaciones; la alcalinidad representa

una fuente de formación de depósitos y la conductividad del agua permite controlar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua.

Para el acondicionamiento del agua, en primer lugar se realiza la coagulación y filtración del material suspendido, una decantación natural removerá parcialmente los sólidos suspendidos pero el tiempo de decantación es significativo, por lo que se acelera a partir de un proceso de coagulación; mediante el uso de ciertos compuestos químicos, los materiales muy finos contenidos producen grandes partículas que se pueden decantar rápidamente. Existen coagulantes orgánicos e inorgánicos, previo al tratamiento de coagulación se trata el agua con cloro para oxidar la materia orgánica.

Luego de la clarificación del agua por coagulación, el agua debe ser filtrada para remover partículas finas suspendidas que no se han retenido en los procesos de coagulación y sedimentación, son necesario filtros de carbón activado para remover trazas de materia orgánica o excesos de cloro residual.

Finalmente, después de remover los materiales suspendidos en el agua cruda, se debe quitar la dureza del agua mediante ablandadores, que son tratamientos químicos cuya función es intercambiar los elementos que provocan la dureza (calcio, magnesio, sílice) por iones.

En cuanto a la remoción de gases se usan normalmente desgasificadores, debido a que a altas temperaturas se reduce la solubilidad de los gases en el agua, favorece a su eliminación en estas condiciones.

Un adecuado tratamiento del agua permite:

- Evitar la formación de depósitos en las superficies internas, perjudican el traspaso de calor y sobrecalentamiento del metal.
- Se controle la corrosión en las superficies internas.
- Eliminar gases disueltos en el agua.
- No exista la formación de espumas y el arrastre con el vapor de los sólidos presentes en el agua del caldero, retardos de suministro de vapor.
- Prevención del agrietamiento intercrystalino o aquebradización cáustica del metal del caldero.

**Purga.-** Al evaporarse el agua dentro del caldero, los sólidos contenidos se concentran en el interior y si esta concentración excede ciertos límites la calidad del vapor se verá afectada por el arrastre de los mismos. La concentración de éstos sólidos en el interior del caldero puede ser controlado, mediante la remoción del agua del caldero a través de la válvula de purga.

### 2.1.2 SISTEMA DE SUMINISTRO DE DIESEL

El sistema de alimentación de diesel cuenta con un tanque de almacenamiento diario y a través de una bomba se distribuye el combustible hacia los calderos. La circulación continua de diesel al quemador moviliza una tasa del 50% mayor a la tasa de diesel que se quema a condiciones de alto fuego. La presión aproximadamente está regulada entre 10-15 PSI.

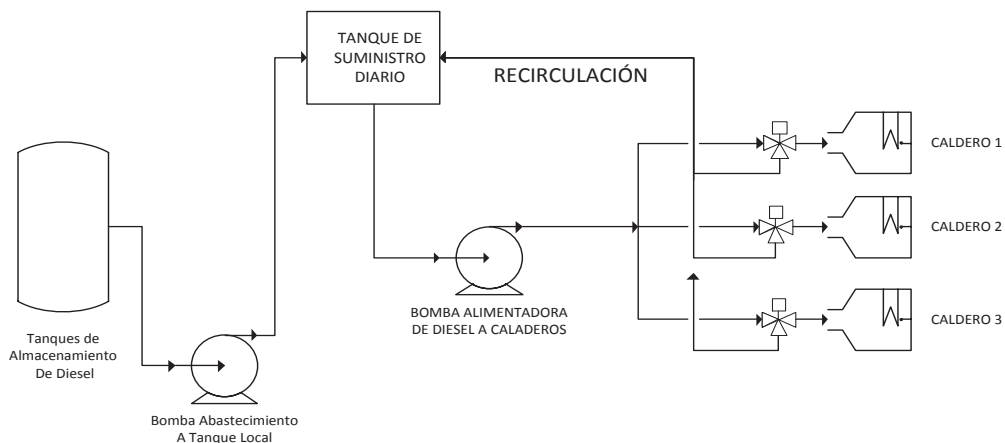


Figura 2.2. Suministro de Diesel a los calderos del IESS Hospital de Ambato. [18]

## 2.2 DIAGRAMA DE FUNCIÓN DEL SISTEMA

La **Figura 2.3**, presenta el diagrama funcional del sistema generador de vapor del IESS Hospital de Ambato.



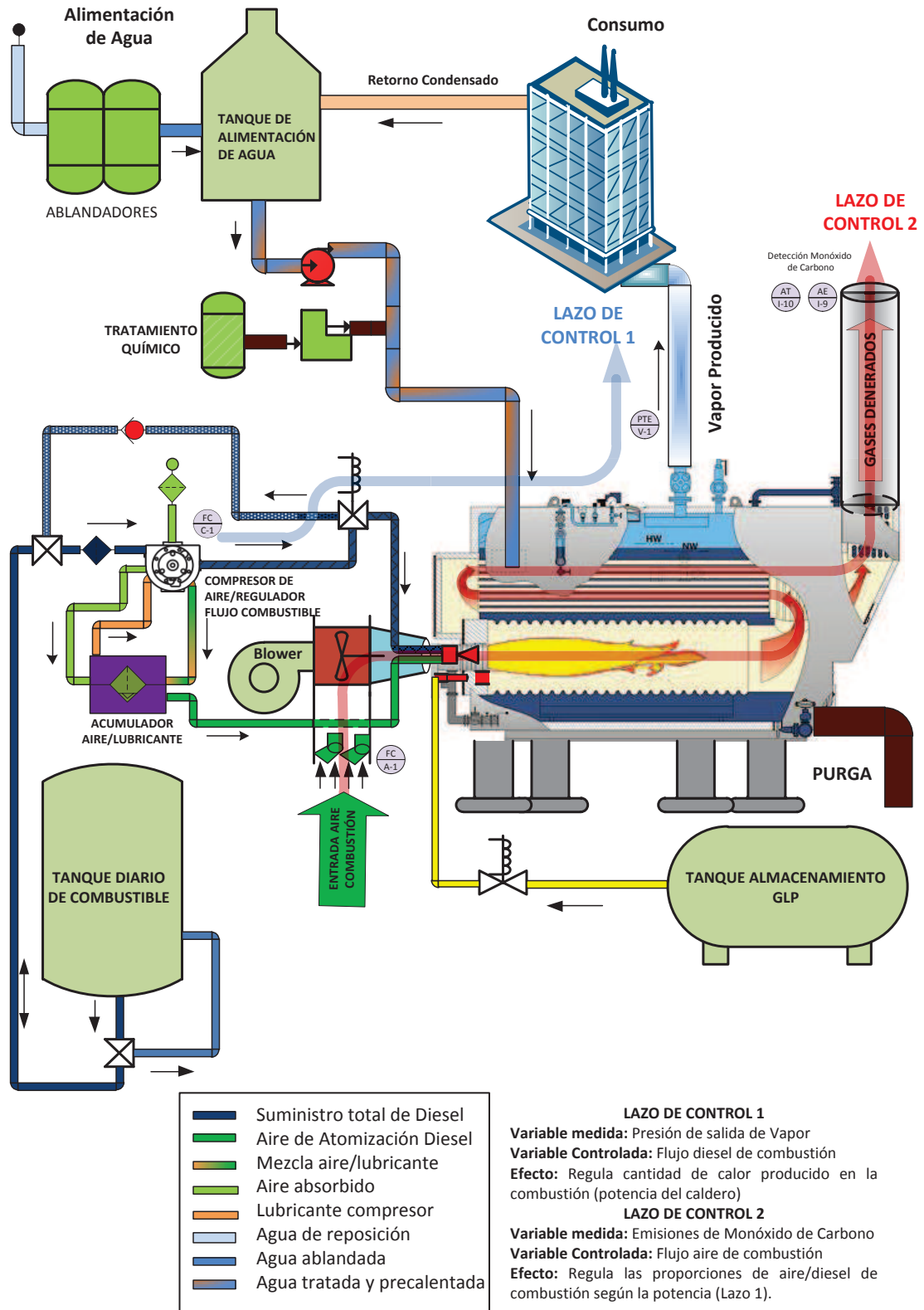


Figura 2.3 Diagrama Funcional Sistema Generador de Vapor

### 2.3 DIAGRAMA P&ID DEL CALDERO



Tabla 2.1 Lista de Componentes del Sistema

Elemento	Material	Tamaño	Especificación	Tipo	Cantidad
<b>ALIMENTACIÓN DE GAS</b>					
HV	Aceros aleados	1/2 "	Válvula de paso manual	Mariposa	2
PCV	Aceros aleados	1/2 "	Regulador reductor de presión	Consigna ajustable manual	1
PSV	Aceros aleados	1/2 "	Válvula de alivio de presión	Seguridad	1
YVZ	Aceros aleados	1/2 "	Electroválvula	Piloto	1
BWV	Aceros aleados	1/2 "	Sonda de dispersión de gas	Piloto	1
ECZ	Aluminio	1/2 "	Fuente de Ignición	Eléctrico	1
BE	Semiconductor	1/2 "	Sensor de llama	Ultravioleta	1
ET	Varios	-	Transmisor de voltaje	Electrónico	1
YI	Plástico		Indicador de estado	Eléctrico	5
<b>ALIMENTACIÓN DE DIESEL</b>					
PDV	Aceros aleados	1/2 "	Válvula diferencial de presión	3 vías	3
PIG	Aceros aleados	1/4 "	Manómetro	Mecánico	2
HV	Aceros aleados	1/2 "	Válvula de paso manual	Bola	1
FRCV	Aceros aleados	1/2 "	Válvula de control de flujo	Mecánico	1
ZC	Aceros aleados	1/2 "	Control de Posición (Modutrol)	Electromecánico	1
YZV	Aceros aleados	1/2 "	Electroválvula principal	3 vías Acción directa	1
BOWV	Aceros aleados	1/4 "	Inyector Atomizador de diesel	Autoregulado	1
UC	Plástico	1/2 "	Filtro	Mecánico	2
PSE	Metálico	1/2 "	Detector de presión	Mecánico	1
LS	Metálico	-	Detector nivel de presión	Mecánico	1
<b>AIRE DE COMBUSTIÓN</b>					
FRCV	Aceros aleados	1/2 "	Control de flujo (Damper)	Mecánico	1
ZC	Metálico	-	Control de Posición	Electrónico	1
M	Metálico	-	motor de Pasos	Electrónico	1
FSE	Metálico	1/4 "	Detector de Flujo	Mecánico	1
LS	Metálico	1/4 "	Detector de nivel de flujo	Mecánico	1
ZSZ	Metálico	-	Final de Carrera compuerta	Eléctrico	1
<b>Control de Nivel de Agua</b>					
LALL	Mercurio	1/2 "	Detector nivel Bajo-Bajo	Seguridad	1
LAL	Mercurio	1/2 "	Detector nivel Bajo	Control	1
LAH	Mercurio	1/2 "	Detector de nivel alto	Control	1
LG	Vidrio	1/2 "	Visor de nivel	Control	1
LFC	Metálico	1/2 "	Control de nivel de agua	Eléctrico	1

<b>Control de Gases</b>					
AT	Dióxido de Estanio	-	Sensor de Monóxido de Carbono	Eléctrico	1
IT	Varios	-	Transmisor de corriente	Electrónico	1
<b>CONTROL DE PRESIÓN</b>					
PTE	Acero	1/2 "	Sensor Transmisor de Presión	Diafragma	1
PSIE	Mercurio	1/2 "	Detector de sobrepresión	Seguridad	1
PI	Plástico	1/2 "	Manómetro	Control	1
PSV	Acero	1 "	Válvula de alivio de presión	Seguridad	2
<b>ELEMENTOS DE CONTROL Y VISIÓN PANELES</b>					
HZ	Metálico	-	Pulsador/Selector manual	Seguridad	2
YS	Metálico	-	Detector de estado	Seguridad	2
TI	Metálico	1/4 "	Indicador de temperatura gases	Control	1
BG	Vidrio	1 "	Visor de cámara de combustión	Control	1
TTE	Acero	1/2 "	Termocupla tipo K	Control	1
<b>PURGAS</b>					
LMCV	Aceros aleados	1 "	Válvula de alivio momentáneo	Mecánico	2
HV	Aceros aleados	1 "	Accionamiento Manual	Mecánico	<u>2</u>

### 2.3.1 ESPECIFICACIÓN DE ACTUADORES:

**BWV** Sonda de dispersión de Gas: Constituye el grupo sonda y generador eléctrico de ignición ECZ.

**ECZ** Generador Eléctrico de ignición: Voltaje de Ignición 6000 Vca, 20mA. Alimentado por un Transformador de Voltaje primario 120 Vca.

**BOWV** Inyector Atomizador de Diesel: Caudal Normal 40 gph - 60 gph.

**BWV** y **BOWV** se especifica en tamaño 84 según su manual; Modelo de Quemador: DL-84P

**BE** Sensor de Llama de tipo ultravioleta: Incluye su acondicionamiento eléctrico. Marca: Honeywell serie: C7027A.

**ZC** Motor Modutrol IV Series 90. Alimentación 120 Vca.



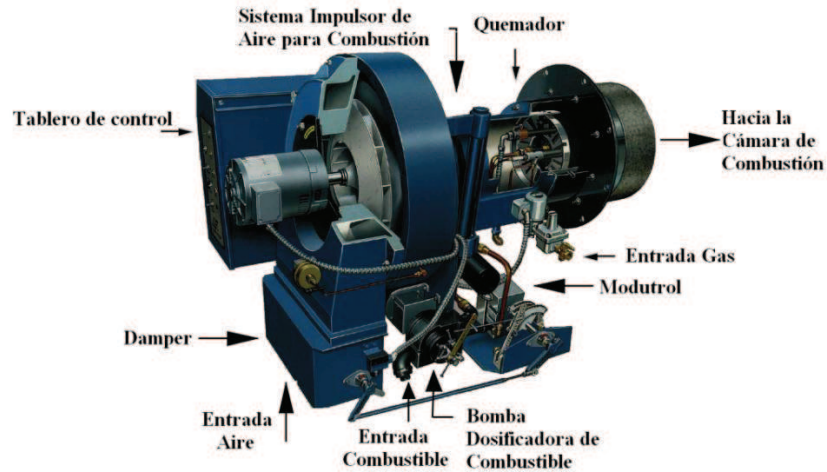
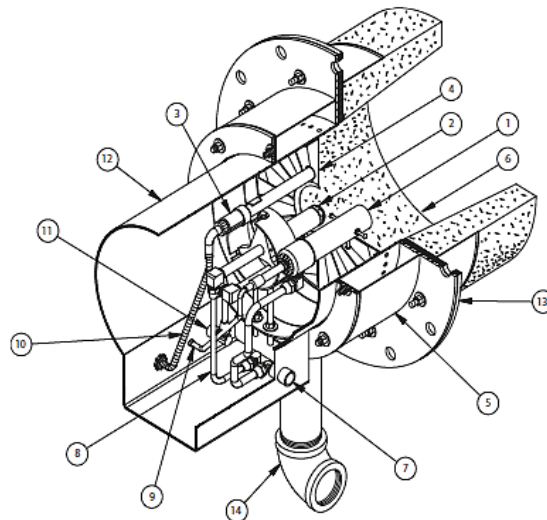


Figura 2.5 Sistemas asociados a la combustión en el quemador [19]

#### 2.4.2 CONSTITUCIÓN DEL QUEMADOR:

El quemador es la fuente donde inicia la combustión, a continuación observamos su constitución:



- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. Gas piloto con generador eléctrico de ignición | 8. Línea de aire Atomizado  |
| 2. Inyector de diesel con aire atomizado          | 9. Conductor electrodo      |
| 3. Sensor de llama                                | 10. Conductor sensor de gas |
| 4. Difusor de aire                                | 11. Entrada diesel          |
| 5. Puertos de gas en colector envolvente          | 12. Tubo explosión          |
| 6. Cámara refractora                              | 13. Juntura de Cámara       |
| 7. Puerto de entrada de gas                       | 14. Entrada de Gas          |

Figura 2.6 Estructura del quemador [19]

El modelo del quemador, indica sus características y cuando se emplee un dato se hará referencia al modelo DL - 84P: DL indica que el combustible utilizado es Diesel N° 2, 84 es el tamaño del quemador y P la presión interior de la cámara de combustión.

### 2.4.3 SISTEMA IMPULSOR DE AIRE PARA LA COMBUSTIÓN:

Este sistema es el encargado de ingresar hasta la cámara, el aire necesario para la combustión a una presión determinada por el diámetro del impulsor. El flujo de aire depende de las dimensiones del ducto y se controla a través de un damper, formado por dos tapas que permiten el flujo de aire según la posición del modutrol.

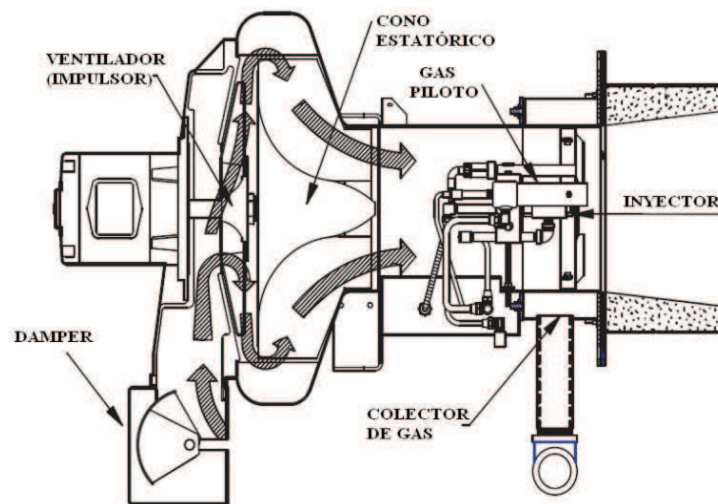


Figura 2.7 Sistema Impulsor de aire [20]

### 2.4.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE DIESEL:

La línea de entrada está un nivel más alto que la línea de ingreso a la bomba dosificadora de combustible (mínima diferencia recomendada 50 cm), esto evita el posible ingreso de fracciones de aire a la bomba, seguida por un manómetro, una válvula de compuerta, un filtro, llega a la bomba dosificadora que es regulada a través del motor modutrol, este flujo de diesel regulado llega a una válvula de tres vías cuya primera salida está conectada a una electroválvula (válvula principal de diesel), la cual, de estar activada permite el flujo de diesel directamente hacia el inyector, caso contrario retorna por la salida dos a través de una válvula check hacia el punto de entrada de diesel en donde está instalada una válvula de resorte ajustable de presión y retorno, encargada de permitir el ingreso de la cantidad de diesel de recirculación y retornar el diesel excedente de la bomba dosificadora hacia el tanque de suministro diario de diesel. En la **Figura 2.8** se encuentra un diagrama de la distribución descrita:





Como se observó anteriormente, la bomba dosificadora de combustible es posicionada por el modutrol. El aire entra a un compresor rotativo a través de un filtro, y circula hacia un tanque de almacenamiento aire/aceite que se mantiene a la presión de atomización. El rotor del compresor es enfriado y lubricado continuamente por aceite bajo presión desde el tanque de aire/aceite, el vapor de aceite es extraído por un expulsor de humo colocado en la parte superior del tanque y el aire de esta sección es conducida a volumen constante para la atomización hacia el inyector, la presión del aire se incrementa conforme la tasa de combustión aumenta.

#### 2.4.6 INYECTOR DE DIESEL:

Tiene en sus puertos de entrada aire de atomización y diesel regulado desde la bomba dosificadora, el aire de atomización circula por el cuerpo del inyector y llega en una envolvente hasta el turbulenciador por cuyo interior circula diesel que es forzado hacia los puertos laterales en donde la mezcla aire/diesel se produce y pasa a través del orificio del inyector en un cono de diesel atomizado. Una velocidad y ángulo adecuados de las finas partículas aseguran una buena mezcla con el aire de combustión, provee un inicio suave y una excelente eficiencia en la combustión. Durante la pre purga y la post purga, la punta del inyector es purgada con aire, previene futuras goteras o residuos de materia quemada.

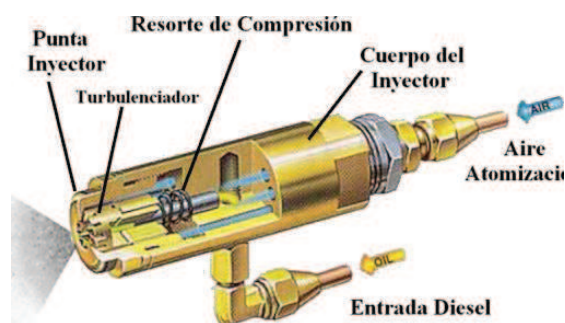


Figura 2.10 Inyector de Diesel [21]

#### 2.4.7 REGULACIÓN DE TASA DE COMBUSTIÓN:

La regulación de combustible está a cargo del motor modutrol, que mediante un acoplamiento de brazos mecánicos regula la bomba dosificadora y el damper de aire paralelamente, notemos que dichos elementos son ajustados mecánicamente

y varían en proporciones distintas; la posición del modutrol se regula por medio de un control proporcional de presión presuretrol L91 en función de la presión de vapor. La **Figura 2.11** muestra el acoplamiento mecánico.

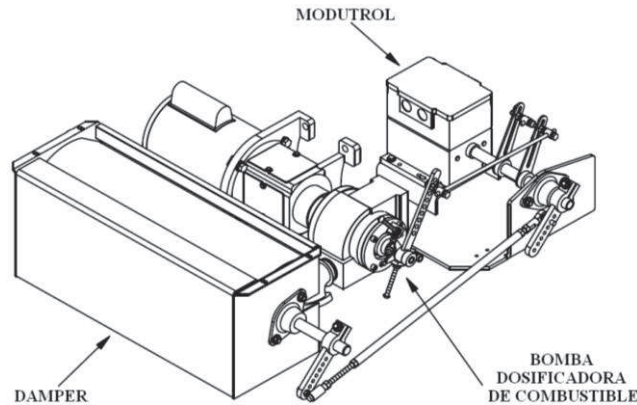


Figura 2.11 Sistema actuador regulación de combustión [21]

#### 2.4.8 SISTEMA DE GAS:

El caldero utiliza GLP para generar llama, esto se justifica ya que el GLP presenta mayor facilidad de combustión respecto al diesel.

La línea de suministro de gas al caldero se conecta directamente desde el tanque de almacenamiento de GLP del Hospital; permite controlar el paso de gas manualmente por medio de 2 válvulas tipo mariposa instaladas en la entrada, una válvula reguladora de presión ajusta la presión requerida, una válvula de venteo; y una electroválvula piloto de gas que se abre únicamente durante el periodo de ignición y se cierra después de que se establecido la llama principal del caldero.



Figura 2.12 Circuito de Ingreso de GLP hacia el quemador del caldero [21]

#### 2.4.9 SISTEMA DE CONTROL:

El operador tiene acceso a los siguientes controles:

- Interruptor de encendido/apagado

- Selector de modo de funcionamiento: Manual, permite activar el caldero cuando el operador lo requiera y Automático, el caldero se activa cuando el control de programación general de los tres calderos instalados en el IESS Hospital de Ambato lo habilita.
- Selector de modo de modulación: automático, donde la regulación de combustión se realiza automáticamente mediante el sensor de presión y manual, donde la regulación de combustión se realiza mediante un potenciómetro ajustable por el operador.

Además contiene luces indicadoras: Activación del caldero, ignición, válvula principal (diesel), fallo de llama; este último como se verá luego en el funcionamiento del control provoca un paro en la secuencia ejecutada y reinicio del ciclo de programa; en caso de funcionamiento automático, bloquea la activación del tablero general haciéndose necesario un reseteo manual.

A continuación se observa las características más importantes de algunos componentes del caldero:

#### **2.4.10 CONTROL DE NIVEL DEL CALDERO:**

##### **McDONELL Serie No. 157**

Este dispositivo provee un control a la bomba de abastecimiento de agua del caldero, detección de nivel bajo de agua y Alarma por nivel bajo-bajo de agua; incorpora una columna visible del nivel contenido en el caldero. Su presión máxima de trabajo es de 150 PSI.

Su operación se establece en función de un nivel de corte (“cut-off” Level), tal como se indica en la Figura **2.13**. El switch del control de la bomba de abastecimiento de agua se cierra y la activa cuando el nivel del agua del caldero cae hasta una altura ( $h_1$ ) superior al nivel de corte. Cuando el nivel de agua ha bajado hasta el nivel de corte se abren los contactos del quemador apagándolo y se cierran los contactos de la alarma, activándola. Cuando el nivel de agua del caldero sube nuevamente esa altura ( $h_1$ ) sobre la línea de corte los contactos del quemador se cierran y los contactos de la alarma se abren, un aumento adicional en el nivel del

agua hará que llegue hasta una altura ( $h_2$ ) o nivel máximo en donde se abren los contactos del circuito de control de la bomba de abastecimiento de agua.

Este principio de funcionamiento tiene pequeñas variantes entre las diferentes series así como los valores de las alturas ( $h_1$ ,  $h_2$ ), se establecen para cada modelo. A continuación se muestra un esquema del dispositivo:

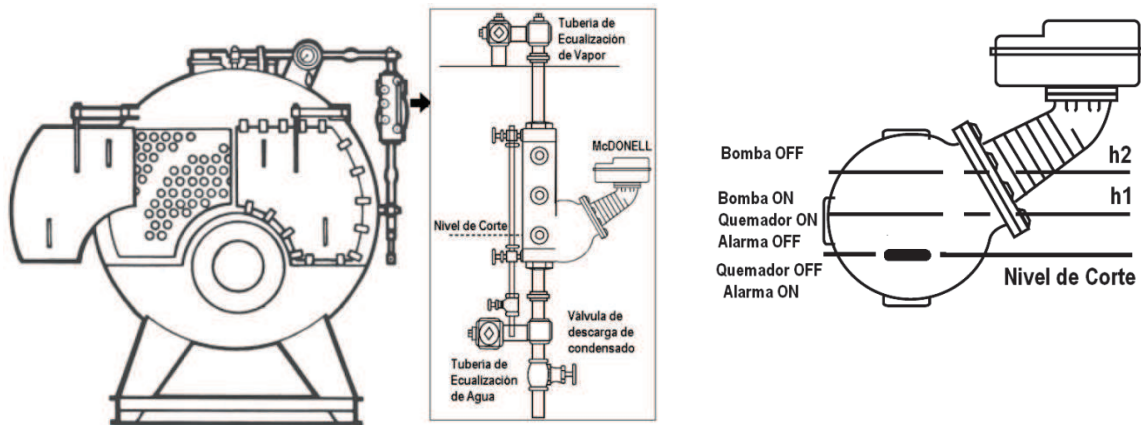


Figura 2.13. Disposición y Puntos de trabajo de Mc Donell [22]

La disposición de los contactos eléctricos del McDonell se muestra en la Figura 2.14:

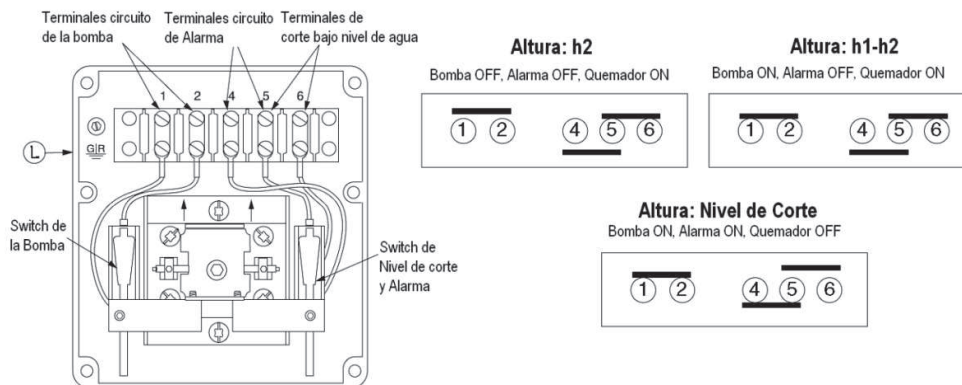


Figura 2.14 Diagrama eléctrico de contactos internos McDonell [22]

Las características eléctricas se detallan en la **Tabla 2.2**:

Tabla 2.2. Características Eléctricas de Contactos Mc Donell [22]

Capacidad de corriente en los Contactos Circuito de Bomba y Nivel de Corte					
Motor	120 VAC	240 VAC	120 VDC	240 VDC	Pilotaje
Plena Carga	7,4 A	3,7 A	2,4 A	1,2 A	345 VA
Rotor Bloqueado	44,4 A	22,2 A	24,0 A	12,0 A	120/240 VAC
Capacidad de corriente en los Contactos Circuito de Alarma					
	120 VAC	240 VAC	120 VDC	240 VDC	
	1:00 AM	1/2 A	1/2 A	1/4 A	

Adicionalmente el caldero cuenta con un control de nivel de líquidos de la serie 1GXXX de Warrick.

El control puede ser conectado dependiendo de la operación que se desee en sus contactos con relación al nivel del líquido en cualquiera de estos cuatro arreglos que se presentan en la Tabla 2.3.

### Control de Nivel Warrick

Es un dispositivo que contiene dos electrodos ubicados en el interior del caldero, siempre y cuando el nivel de líquido mantenga continuidad entre los electrodos el caldero arranca caso contrario pasa al estado de espera, utiliza una señal de voltaje de 120 Vca.

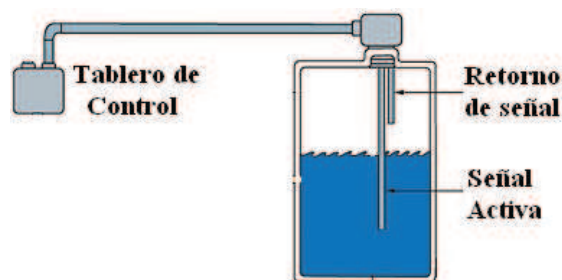
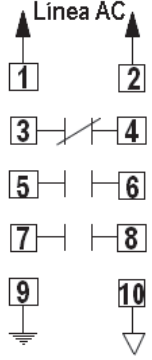
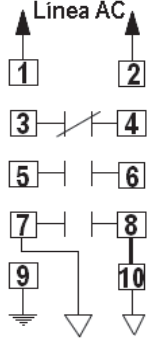
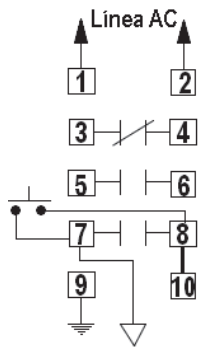
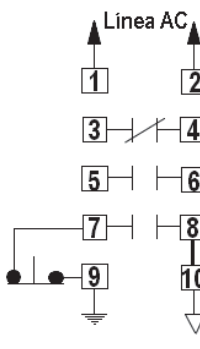


Figura 2.15 Esquema de funcionamiento Control de nivel Warrick [23]

Tabla 2.3. Formas de Conexión relé de control de Nivel Warrick [24]

<p align="center"><b>DIAGRAMA 1.</b> <b>SERVICIO DE NIVEL ÚNICO</b> <b>CORTE EN NIVEL ALTO O BAJO Y</b> <b>ALARMA</b></p>	<p align="center"><b>DIAGRAMA 2.</b> <b>SERVICIO DE NIVEL DIFERENCIAL</b> <b>ENCENDIDO O APAGADO DE BOMBA</b></p>
	 <p>Importante: Asegurar la conexión entre 8-10</p>
<p>Operación: El electrodo está conectado al terminal 10, cuando el nivel está sobre el electrodo los contactos 3-4 se abren y los contactos 5-6 y 7-8 se cierran. Si el nivel está bajo el electrodo los contactos vuelven a su posición original.</p>	<p>Operación: Se conecta un electrodo corto en el terminal 10, cuando el nivel lo sobrepasa los contactos 3-4 se abren y los contactos 5-6 se cierran. Estos mismos contactos vuelven a su posición normal cuando el nivel está bajo el electrodo largo conectado en el terminal 7.</p>
<p align="center"><b>DIAGRAMA 3.</b> <b>SERVICIO DE NIVEL BAJO CON</b> <b>DESBLOQUEO EXTERNO</b> <b>CORTE EN NIVEL BAJO Y ALARMA CON</b> <b>RESETEO MANUAL</b></p>	<p align="center"><b>DIAGRAMA 4.</b> <b>SERVICIO DE NIVEL ALTO CON</b> <b>DESBLOQUEO</b> <b>CORTE EN NIVEL ALTO Y ALARMA CON</b> <b>RESETEO MANUAL</b></p>
 <p>Importante: Asegurar la conexión entre 8-10</p>	 <p>Importante: Asegurar la conexión entre 8-10</p>
<p>Operación: Cuando el nivel permanece bajo el electrodo conectado al terminal 7, los contactos 3-4 y 5-6 permanecen en su posición original. Los contactos 3-4 se abren y los contactos 5-6 se cierran cuando el nivel está sobre el electrodo Y el pulsador normalmente abierto es accionado momentáneamente.</p>	<p>Operación: Los contactos 3-4 se abren y los contactos 5-6 se cierran cuando el nivel está sobre el electrodo del terminal 10. Los mismos contactos vuelven a su posición original cuando el nivel permanece bajo el electrodo Y el pulsador normalmente cerrado es momentáneamente accionado.</p>

## 2.4.11 CONTROLES DE PRESIÓN:

### Pressuretrol Controllers Serie L404 A-D, F

Estos dispositivos manipulan contactos en la línea de voltaje y proveen control operativo, protección automática por límites, reseteo manual de sus protecciones para sistemas de presión de hasta 300 PSI. Posee como elemento sensor de presión un diafragma de acero inoxidable o un fuelle de bronce en ciertos modelos y un switch compuesto por mercurio, su rango de trabajo es:  $-37^{\circ}\text{C}$  –  $66^{\circ}\text{C}$ ; otros modelos contienen un elemento móvil en lugar de mercurio. Permite la regulación del valor referencial a partir de tornillos colocados en la parte superior y una escala adecuada. Su constitución se presenta en la **Figura 2.16**:

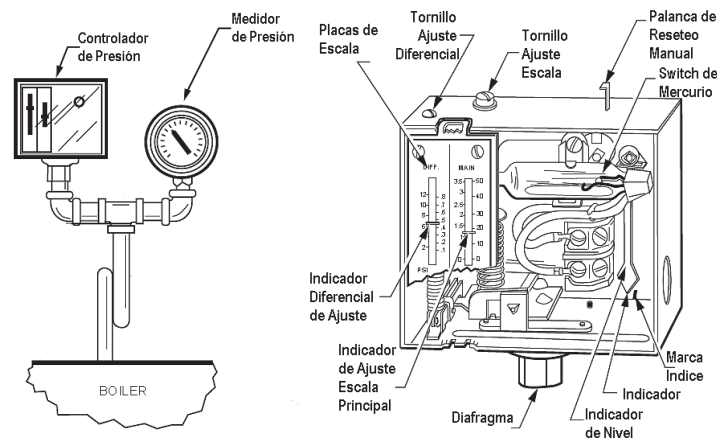
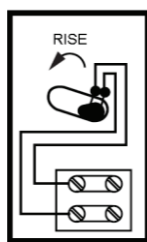


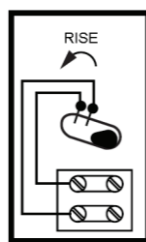
Figura 2.16 Montaje y constitución de un controlador de Presión [25]

Figura 2.17 indica el funcionamiento del dispositivo de tres series diferentes:



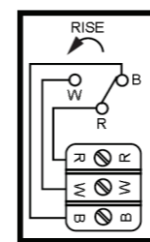
L404A,C

Si la presión sobrepasa el nivel establecido, se desconectan los contactos.



L404B,D

Si la presión sobrepasa el nivel establecido, se cortocircuitan los contactos.



L404F

Elemento móvil: Ante una sobre presión, desconecta RB y conecta RW.

Figura 2.17 Diagrama esquemático interno de Contactos Control de Presión [25]

## CONTROL PROPORCIONAL DE PRESIÓN:

El control proporcional pressuretrol L91, provee control directo a motores modulantes o válvulas usadas en quemadores automáticos o sistemas generadores de vapor. El rango de temperatura de operación del dispositivo es: 0°C – 66°C. Estos modelos son aptos para sistemas de presión de hasta 300 PSI.

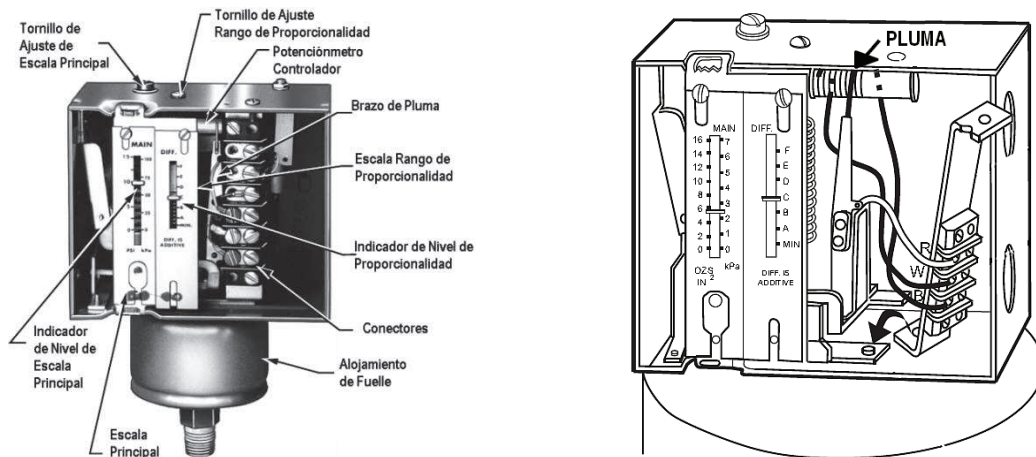


Figura 2.18. Partes de un control proporcional Pressuretrol. [26]

El potenciómetro es la realimentación eléctrica hacia el motor o hacia la válvula actuadora. Mientras la presión del medio controlado sea más cercana al set point del controlador, el circuito eléctrico estará balanceado; y mientras el circuito esté balanceado, el actuador no dará paso a la combustión. El elemento sensor de presión es un fuelle de fósforo-Bronce, aunque también se puede encontrar en algunas series fuelles de latón. La acción principal de control está basada en que la variación de presión produce una variación en la resistencia de un potenciómetro en la mayoría de modelos de 140Ω; los terminales de dicho elemento se conectan a una fuente de 24 V de corriente Alterna.

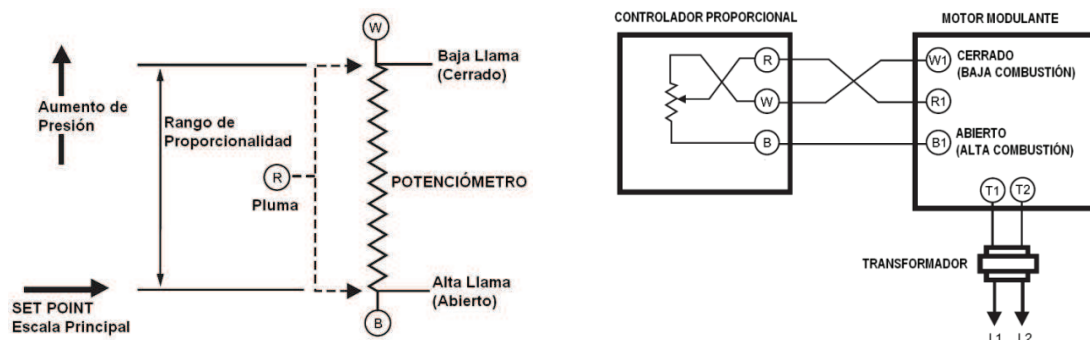


Figura 2.19. Puntos de Operación y conexión a un motor modulante [27]



### Operación:

Las variaciones de presión producen que el fuelle se contraiga o expanda, a la vez tiene un enlace con la pluma que se mueve a lo largo del devanado del potenciómetro; causando una variación de resistencia entre los puntos R-B y entre R-W según la **Figura 2.19**.

Si la presión del medio aumenta la pluma del potenciómetro se mueve hacia W, el controlador hace que el motor suspenda el flujo de combustible hacia el quemador y así se detiene la combustión hasta que la presión del medio alcance el nivel ajustado, caso contrario si la presión en el medio disminuye, la pluma del potenciómetro se mueve hacia B el controlador provoca un aumento en la tasa de combustión hasta que la presión alcance el nivel deseado.

### Modutrol

Es el encargado de regular la tasa de combustión pues varía la apertura/cierre del damper de aire y regula el flujo de diesel que ingresa al inyector. Está constituido por un transformador reductor, un motor de 24 Vca, y un juego de engranes; el motor gira 90° y para un movimiento total desde 0° necesita un tiempo de 30 segundos, está diseñado para ser controlado directamente desde un control proporcional de presión, así como se muestra en la **Figura 2.20**.

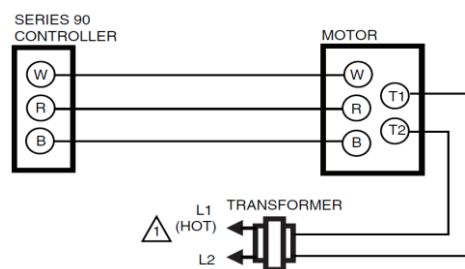


Figura 2.20 Conexión entre modutrol y Controlador de presión serie 90 [27]

Dado que incorpora un transformador, basta alimentarlo con una fuente de 120 Vca; es posible controlar su posición al producir desbalances de voltaje entre sus terminales, además posee dos contactos (1 normal abierto y 1 normal cerrado) que cambian de estado si el motor cruza un determinado ángulo límite ajustable.

### 2.4.12 DETECTOR DE LLAMA DE COMBUSTIÓN

En los sistemas de seguridad, una apropiada detección de llama se hace considerando las propiedades físicas de la llama. Así se encuentran dos tipos de detectores de llama:

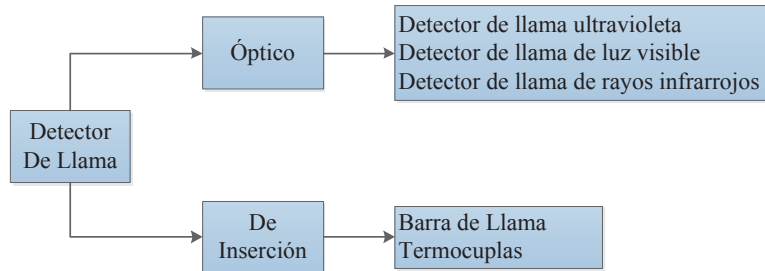


Figura 2.21 Tipos de detectores de Llama [28]

Los detectores de llama ópticos contienen un sensor que indirectamente detecta el brillo en la cámara de combustión, el color de llama o la longitud de onda producida y un circuito electrónico para la conversión de señal y amplificación, al ser este un método indirecto se debe tener sumo cuidado de que no reciba influencia alguna de la luz exterior.

Los detectores de llama de inserción se usan insertando el sensor directamente en la llama y pueden detectar: la temperatura de llama, tamaño y estado, son muy fiables sin embargo se debe tener cuidado con el tipo de respuesta y la posición del sensor.

El sensor utilizado en el caldero es uno de Honeywell de la serie C7027A, es óptico y detecta la radiación ultravioleta producida por la llama.

Su temperatura de trabajo está comprendida en el rango:  $-18\text{ }^{\circ}\text{C} - 102\text{ }^{\circ}\text{C}$ , puede usarse hasta una presión máxima de 5 PSI, según el fabricante el elemento sensor de este detector tiene una expectativa de vida útil de 40.000 horas de uso continuo bajo condiciones de operación especificadas. El detector puede responder si se coloca en superficies refractoras a temperaturas sobre los  $1371\text{ }^{\circ}\text{C}$ , siempre y cuando dicha superficie refractora represente un porcentaje significativo del campo de vista del detector; la **Figura 2.22** muestra el montaje recomendado por el fabricante.

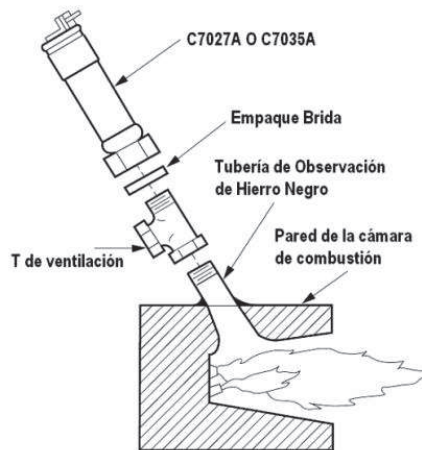


Figura 2.22 Montaje de un Detector de Llama en una cámara de combustión. [29]

Las acciones del sistema de control considerando el detector de llama son:

- Parar el quemador ya sea en operación manual o automática, en caso de fallo.
- Iniciar el quemador en la secuencia correcta y monitorizar la llama de combustión durante la operación.
- Protección contra temperaturas o presiones anormales.
- Control de la proporción de combustión del quemador.
- Mantener la operación de inicio en estado de espera mientras el quemador este parado.

#### 2.4.13 ELEMENTOS AUXILIARES:

Además de los sensores y elementos de control que se describió el caldero cuenta con los siguientes detectores:

**Detector de baja presión.-** Es un contacto que se cierra cuando la presión baja de la mínima establecida, para dar inicio un nuevo ciclo de funcionamiento.

**Detector de Alta presión.-** Es un contacto que se abre cuando la presión sobrepasa el valor máximo establecido, para finalizar un ciclo de funcionamiento.

**Detector de presión de aire para atomización.-** Posee dos contactos un NA y otro NC, que cambian de estado cuando existe presión en la línea de aire para atomización de diesel.

**Detector de flujo de aire de combustión.-** Tiene un contacto normalmente abierto que se cierra cuando existe flujo de aire a través de la cámara de combustión.

**Detector de compuerta de quemador cerrada.-** Final de carrera, contiene un contacto normalmente abierto que se cierra, solamente si la cubierta del quemador está cerrada.

#### **2.4.14 MÓDULO DE RELÉ SERIE 7800 L**

A continuación se describirá la operación del módulo de control del caldero marca Honeywell, la descripción se ha tomado en base al manual de dicho dispositivo.

#### **Secuencia de Operación**

- *Inicio.-* El dispositivo entra en esta secuencia cuando se energiza el Módulo de Relé, o cuando se producen altas variaciones de voltaje o frecuencia durante el funcionamiento. Tiene una duración de diez segundos a menos que no se mantengan las tolerancias de voltaje o de frecuencia caso en el que se inicia una condición de retención hasta cuando se alcanzan las tolerancias admitidas y se reinicia la secuencia inicio. Si no se corrige, la condición de retención permanece por cuatro minutos, posteriormente el módulo se bloquea.
- *Espera.-* El dispositivo está listo para iniciar una secuencia de operación cuando la entrada de la señal de control de operación determina que está presente una llamada de calor. El interruptor del quemador, los límites, el control de operación y todos los circuitos monitoreados por el microprocesador deben encontrarse en el estado correcto para que el módulo de relé continúe a la secuencia de pre purga.
- *Pre purga Normal de Arranque.-* El dispositivo proporciona un tiempo de pre purga que se selecciona entre dos segundos y treinta minutos si el módulo está energizado y el control determina inicio de operación, consiste en: Verificar que los entrecierres de operación, entrecierres de pre ignición, interruptor del quemador, interruptor run/test, entrecierre de bloqueo y todos los circuitos monitoreados estén en estado correcto de operación. Energizar la salida del motor del ventilador y conducir al motor de modulación a posición de alto fuego;

las entradas del entrecierre de bloqueo o del entrecierre de operación (incluye el interruptor del flujo de aire) se deben cerrar dentro de los diez segundos de la pre purga; de otra forma, ocurrirá un apagado de seguridad.

Una vez que el tiempo de pre purga se concluye, el motor de modulación se dirigirá a posición de bajo fuego. Cuando el motor de modulación alcanza la posición de bajo fuego correctamente se pasará a las pruebas de ignición.

- *Pruebas de Ignición.*- Se realiza en dos partes:

a. Período de Estabilización de Llama del Piloto: Con el motor de modulación en bajo fuego, se energizan la válvula piloto de gas y el transformador de ignición, cabe señalar que el módulo posee una salida adicional intermitente durante este proceso, el módulo ignora las entradas de entrecierre de pre ignición. La llama es comprobada después de 4 segundos de ignición y después de 5 segundos se desactiva la fuente de ignición para una terminación rápida de chispa.

b. Período de estabilización de la Llama Principal: Se energiza la válvula principal de diesel cuando se verifica la existencia de llama al final de los 4 segundos del ciclo anterior.

- *Operación.*- Ocurre un período de estabilización de 10 segundos al principio del período, el motor de modulación regula la tasa de combustión, permanece en este estado hasta que la entrada del control indique que la demanda está satisfecha o que se ha abierto un límite.

- *Post purga.*- Quince segundos una vez completado el período de operación, se desactiva la válvula principal de diesel y se mantiene energizada la salida del motor del ventilador para conducir todos los productos de la combustión así como cualquier cantidad de combustible no quemado fuera de la cámara de combustión. También proporciona aire de combustión para quemar el combustible sobrante que proviene de las líneas de combustible después de las válvulas de seguridad. Después de quince segundos se concluye el período de post purga y el módulo regresa al estado de espera.

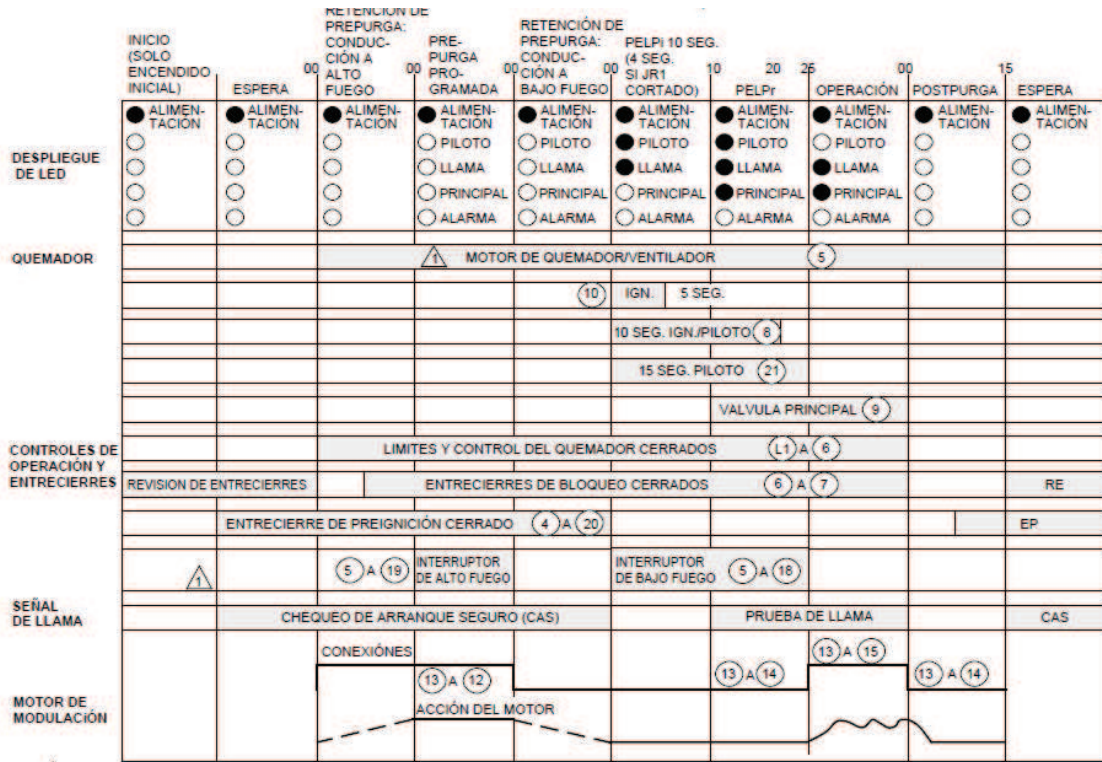


Figura 2.23 Secuencia de Funcionamiento Relé de control Honeywell RM7800L [30]

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema propuesto incorpora un sistema de control serie, que consta de dos lazos de control; cada uno con su propia realimentación. El primer lazo de control se aplica sobre la presión de salida del vapor y se la controla a partir del flujo de combustible, el segundo lazo de control se basa en la medición de las emisiones de monóxido de carbono a la atmósfera y se regula mediante el flujo de aire de combustión. La **Figura 3.1** muestra la estructura de control descrita.

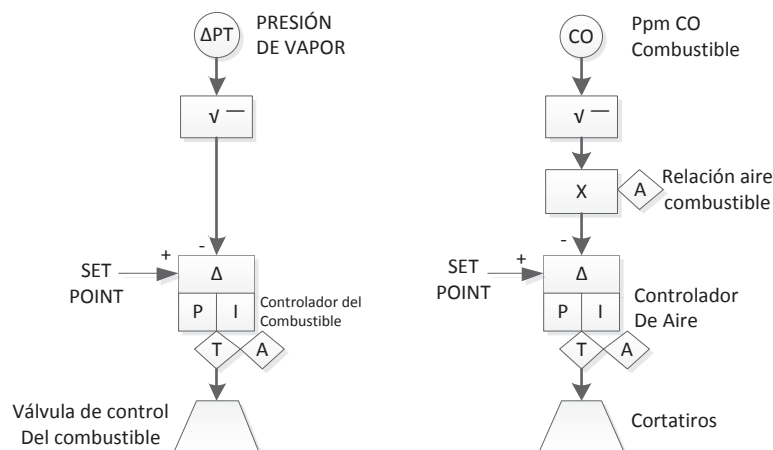


Figura 3.1 Estructura de Control del Sistema

El programa de control se realizó en el TIA (Totally Integrated Automation) Portal V11 de Siemens, que incorpora el software STEP 7 Basic válido para programar PLCs de la serie S7-1200 y el software WinCC Basic V11 válido para programar Basic Panels, es decir una interfaz HMI.

Del capítulo anterior consideramos todos los sensores, detectores y actuadores instalados en el caldero; se consideran también sensores que se agregan para el nuevo sistema de control, estos datos se muestran en la **Tabla 3.1** y **Tabla 3.2**.

Tabla 3.1. Elementos de entrada al PLC

<b>SENSORES</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Estado</b>	<b>Consideración</b>
Sensor de Llama	Bueno	Se usa
Control Proporcional de Presión L91	Bueno	No se usa
Sensor de presión Sitrans P220	Nuevo	Se usa
Termocupla tipo K	Nuevo	Se usa
Sensor de Monóxido de Carbono	Nuevo	Se usa
<b>DETECTORES</b>		
Detector de Alta presión	Bueno	Se usa
Detector de Baja presión	Bueno	No se usa
Detector de flujo de aire	Bueno	Se usa
Detector presión de aire dispersión	Bueno	Se usa
Detector cierre de compuerta	Bueno	Se usa
Mc Donell	Bueno	Se usa
Detector de Nivel sumergido	Bueno	Se usa

Tabla 3.2. Actuadores

<b>SALIDAS DIGITALES</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Estado</b>	<b>Consideración</b>
Fuente de ignición	Bueno	Se usa
Electroválvula de gas	Bueno	Se usa
Electroválvula de combustible	Bueno	Se usa
Luz de alarma	Bueno	Se usa
Motor compresor	Bueno	Se usa
Motor ventilador	Bueno	Se usa
<b>SALIDAS ANALÓGICAS</b>		
Control damper	Bueno	Se usa
Control Modutrol	Bueno	Se usa

### 3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Para el diseño del sistema de control se usará la información de cada uno de los sensores descritos en el capítulo anterior.

#### 3.1.1 SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL

Para el control de nivel se utilizan dos dispositivos, un dispositivo Mc donell que controla directamente la bomba alimentadora de agua hacia el caldero, emite una alarma ante nivel bajo-bajo y un detector de nivel marca Warrick en conjunto con



un relé para protección o bloqueo del quemador ante un fallo del control de nivel Mc donell.

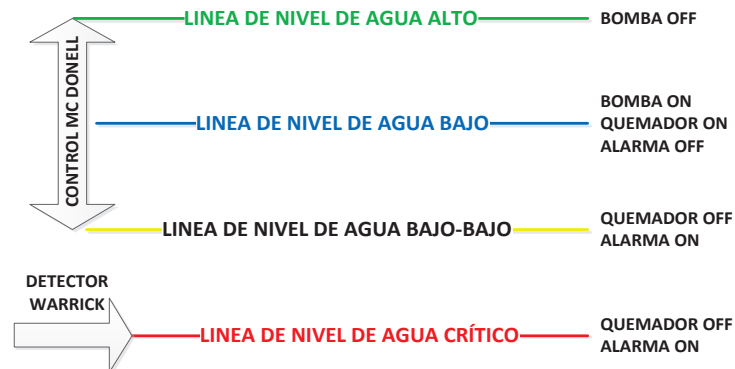


Figura 3.2. Operación de dispositivos para Control de nivel

### Conexiones:

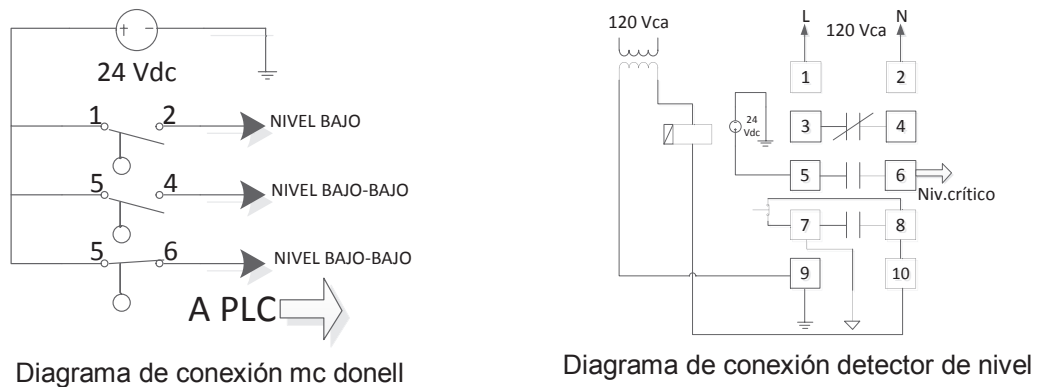


Figura 3.3 Conexión controles de nivel de agua.

En la **Figura 3.3** se presenta el esquema de conexión eléctrica de los dispositivos que se usan para el control de nivel de líquido en el interior del caldero. Los contactos 1-2 del Mc Donell se cierran cuando se alcanza el nivel bajo de agua y se abren cuando se alcanza el nivel alto, se utilizan para controlar la bomba alimentadora de agua hacia el caldero; los contactos 5-4 se cierran cuando llega al nivel bajo-bajo, se utiliza para activar la alarma por falta de agua; los terminales 5-6 se abren cuando el nivel de líquido llega a nivel bajo-bajo es un bloqueo para detener la combustión; por si llegará a fallar el control Mc donell, se utiliza un detector de nivel que incorpora un electrodo sumergido en el interior del caldero, suspende el funcionamiento y lanza una señal de alarma.

### 3.1.2 DETECCIÓN DE LLAMA:

Para detectar la presencia de llama se utiliza un sensor de llama de tipo ultravioleta de la serie C7027A de Honeywell, este detector funciona normalmente con módulos de relé propios de la marca, estos dispositivos incorporan un bloque de acondicionamiento electrónico.

Para acondicionar la señal de salida del sensor de llama se utiliza un amplificador de la serie R7249A de Honeywell, esta tarjeta amplificadora es polarizada con voltajes de corriente alterna provistos por un transformador. En la **Figura 3.4** se muestra el esquema de conexión del acondicionamiento de la señal de llama y los voltajes de entrada/salida del transformador, la señal de voltaje de salida del amplificador se conecta a una entrada analógica del PLC previamente escalado por divisores de tensión.

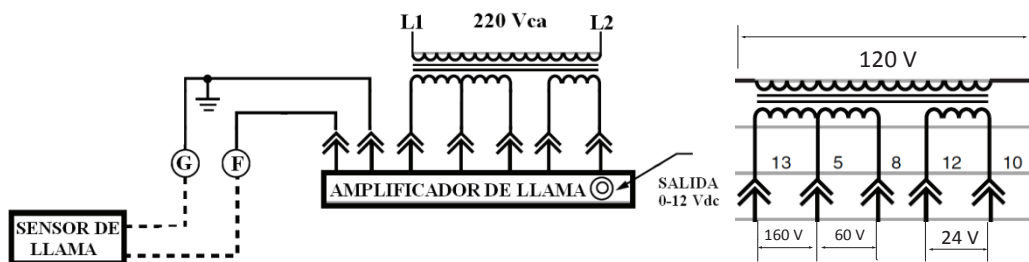
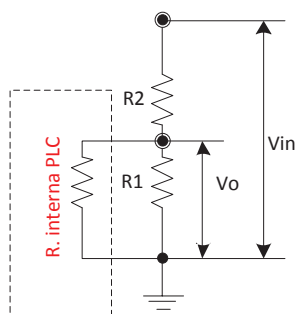


Figura 3.4. Esquema de conexión de sensor de llama [31]

La señal de salida entregada por el amplificador es una señal variable de voltaje (0V - 12V), se hace necesaria una etapa de acondicionamiento antes de ingresar al PLC. A continuación se detalla el análisis. La entrada al módulo del PLC se considera como una resistencia de 1 MΩ, esto se puede observar en las hojas de características del módulo **ANEXO 4**.



$$V_{in} = I_T \cdot (R1 + R2); \quad I_{R1} = I_{R2} = I_T$$

$$V_{in} = \frac{V_o}{R1} \cdot (R1 + R2) \quad \rightarrow \quad \frac{V_{in}}{V_o} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

$$\frac{R2}{R1} = \frac{V_{in}}{V_o} - 1 \quad \rightarrow \quad \frac{R2}{R1} = \frac{12}{10} - 1 \quad \rightarrow \quad R1 = 5R2$$

La salida de señal se toma de los terminales de R1, ésta resistencia debe ser de un valor considerablemente mayor que la resistencia de entrada del módulo del

PLC manteniendo así el voltaje en sus terminales constante, se asume  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$ . La carga debido a la resistencia será:

$$R_{1eq} = \frac{R_{interna\ plc} \times 10 \text{ M}\Omega}{R_{interna\ plc} + 10 \text{ M}\Omega} = \frac{1 \text{ M}\Omega \times 10 \text{ M}\Omega}{1 \text{ M}\Omega + 10 \text{ M}\Omega} = 909,1 \text{ K}\Omega$$

Lo cual representa una disminución del 10% del valor resistivo real del módulo. De acuerdo a los cálculos anteriores se tiene:

$$R_2 = \frac{R_1}{5} = \frac{909,1 \text{ K}\Omega}{5} = 181,8 \text{ K}\Omega$$

$$R_T = R_1 + R_2 = 909,1 \text{ K}\Omega + 181,8 \text{ K}\Omega = 1,091 \text{ M}\Omega$$

La corriente total será:

$$I_T = V_T / (R_1 + R_2) = 12\text{V} / 1,091 \text{ M}\Omega \quad \rightarrow \quad I_T = 11 \mu\text{A}$$

### 3.1.3 MEDICIÓN DE PRESIÓN:

Según las propiedades del proceso, los requerimientos para el sensor de presión son:

Medida de presión de vapor, temperatura superior a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , con un rango de Medida: 0 PSIG - 150 PSIG. Entre los requerimientos eléctricos se considera que disponga de una salida normalizada de corriente o voltaje.

En el mercado se encontró un sensor transmisor de Presión con salida de corriente normalizada de la marca Siemens, serie SITRANS P220 cuyo elemento sensor constituye una celda piezorresistiva con membrana integradas en una caja de acero inoxidable que mejora sustancialmente su resistencia física. Los datos técnicos del sensor se señalan a continuación:

**Datos técnicos del sensor:** Los datos técnicos se han tomado del manual del sensor.

Tabla 3.3. Características Transmisor de presión SITRANS P220 de Siemens [32]

Características Generales
---------------------------

Rango de medida	0- 200 psi g
Límite de sobrecarga	-14.5 psi g - 550 psi g
Presión de ruptura	1390 psi g
Salida de corriente	4 - 20 mA
Carga	$(U_B - 10V) / 0,02 A$
Alimentación auxiliar $U_B$	7Vdc – 33 Vdc
Consumo $I_B$	menor o igual a 20 mA
Curva característica	Lineal ascendente
<b>Precisión de medida:</b>	
Desviación de medida a 25 °C, incluido error de característica, histéresis y repetitividad	Típica: 0,25 % del valor de fin de escala Máxima: 0,5 % del valor de fin de escala
Tiempo de ajuste	Menor a 1 seg.
Influencia de la temperatura	0,25% / 10K del valor de fin de escala
Influencia de la energía auxiliar	0,005% / V
<b>Condiciones de Aplicación:</b>	
Condiciones de entorno	Uso al aire libre e interiores
Temperatura del proceso	-30 °C – +120°C
Temperatura Ambiente	-25°C – +85°C
Altitud	Máx. 2000 m.s.n.m., en caso de altitud superior, utilice una fuente de alimentación.
Humedad relativa	0...100%

**Diagrama de conexión.-** La señal eléctrica de salida del sensor se conecta mediante una fuente de voltaje auxiliar ( $U_B$ ) en serie al PLC, como se indica en la siguiente figura:

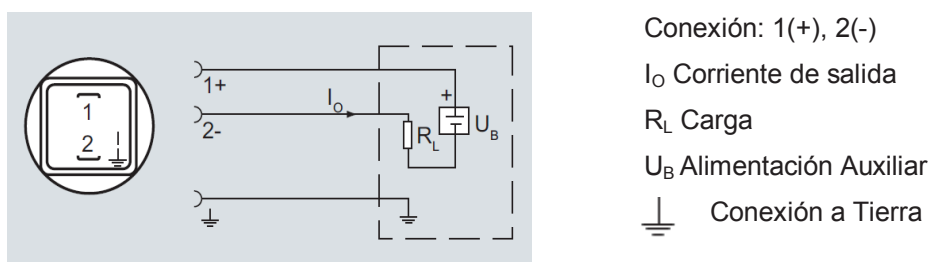


Figura 3.5 Esquema de conexión transmisor de presión [32]

#### Cálculo de la fuente de voltaje:

Según la tabla de datos se cumple:  $R_L = \frac{U_B - 10V}{0,02 A} \rightarrow U_B = 0,02 A \cdot R_L + 10 V$

En el **ANEXO 4** encontramos que la resistencia interna del módulo de entradas analógicas de corriente está comprendido entre: 280  $\Omega$  – 315  $\Omega$ , se considera que la resistencia interna es de 300  $\Omega$ , entonces:

$$U_B = 0,02 A \cdot 300 \Omega + 10 V \quad \rightarrow \quad U_B = 16 V$$

Para asegurar una medida fiable de presión, se debe asegurar un voltaje auxiliar estable y constante; para conseguirlo se aprovecha la fuente de 24V integrada en el PLC, se debe corregir la escala, esto se realiza desde el software. Según las hojas de características del sensor la influencia de la energía auxiliar es del 0,005% / V, entonces se alterará:

$$\% \text{ Alterado} = 24V - 16V = 8V \times 0,005\%/V = 0,04\%$$

El rango de medida de la entrada analógica de 0-20 mA tiene un rango de datos de 13 bits de 0 – 27648, entonces el valor de ajuste es:

$$\text{Valor} = 27648 \times 0,04 = 1106$$

Como tenemos exceso de voltaje, para compensar el valor real, en el programa se debe restar 1106 al valor leído.

### 3.1.4 MEDICIÓN DE TEMPERATURA:

Se usa una termocupla tipo K, marca: DONG YANG SENSOR. Las características según la norma IEC-584-1982, se detallan a continuación [33]:

Composición: Cromel-Alumel;

Termoelemento positivo: Ni = 90%, Cr = 10%; Termoelemento negativo: Ni = 95%, Mn = 2%, Si = 1%, Al = 2%.

Fuerza electromotriz producida: -6,458 mV/°C a 48,838 mV/°C.

Intervalo de medida: -40°C a 1000°C; Clase 2: límite de error,  $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C} - \pm 0,75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La norma considera también el error límite producido al utilizar un cable de extensión, para el caso es 2,5 °C.

Los termopares se forman por la unión de dos metales diferentes que se conectan eléctricamente produciendo una tensión. La tensión generada es proporcional a la temperatura de la unión. Se trata de una tensión pequeña; un micro voltio puede representar varios grados. La medición de temperatura con termopares consiste

en medir la tensión de un termopar, compensar las uniones adicionales y linealizar posteriormente el resultado.

Cuando se conecta un termopar al módulo de termopar SM 1231, los dos hilos de metales distintos se unen al conector de señales del módulo. El punto en el que los dos hilos diferentes se unen el uno con el otro constituye el termopar del sensor.

Dos termopares adicionales se forman donde los dos hilos diferentes se unen al conector de señales. La temperatura del conector genera una tensión que se suma a la del termopar del sensor. Si no se corrige esta tensión, la temperatura indicada será diferente de la temperatura del sensor.

La compensación de unión fría se utiliza para compensar el termopar del conector. Las tablas de termopares se basan en una temperatura de referencia que, por lo general, es de cero grados centígrados. La compensación de unión fría compensa el conector a cero grados centígrados. La compensación restablece la tensión sumada por los termopares del conector. La temperatura del módulo se mide internamente y se convierte luego a un valor a sumar a la conversión del sensor. La conversión del sensor corregida se linealiza entonces utilizando las tablas de termopares.

Para optimizar el funcionamiento de la compensación de unión fría es necesario colocar el módulo de termopar en un entorno térmicamente estable. Una variación lenta (inferior a  $0,1^{\circ}$  C/minuto) del módulo a temperatura ambiente se compensa correctamente dentro de las especificaciones del módulo. Si hay corriente de aire a través del módulo también se producirán errores de compensación de unión fría.

Si se requiere una mejor compensación del error de unión fría, se puede utilizar un bloque de terminales isotérmico. El módulo de termopar permite utilizar un bloque de terminales con una referencia de  $0^{\circ}$  C o  $50^{\circ}$  C. En el manual de datos técnicos del Signal Board de entrada de termopar, se especifica que para un termopar tipo K:

Tabla 3.4. Valores de entrada permisibles al signal Board [34]

Rango de Saturación Mínimo <sup>i</sup>	Rango nominal límite inferior	Rango nominal límite superior	Rango de saturación máximo <sup>ii</sup>	Exactitud rango normal a 25°C <sup>iii</sup>	Exactitud rango normal de -20 °C a 60 °C <sup>iii</sup>
-270,0 °C	-200,0 °C	1372,0 °C	1622,0 °C	±0,4 °C	± 1,0 °C

### Compensación de error:

En la **Figura 3.6** se muestra el error que se introduce en la unión de los cables:

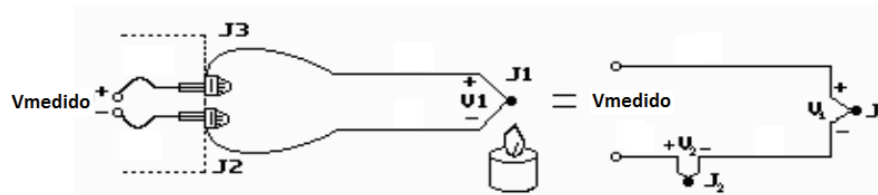


Figura 3.6. Error producto de la conexión [35]

En donde,  $V_{\text{medido}} = V_1 - V_2$

Para compensar el error en la lectura se debe calcular  $V_2$  y sumarle al valor leído por el PLC.

El valor máximo que registra el programa a 1000 °C es 27648, cuando el termopar entrega 41,269 mV y el valor mínimo es -27648 a -40 °C, cuando el termopar entrega -1,527 mV. Se considera una temperatura ambiente de 20°C constante, y si se asume el coeficiente de Seebeck de la conexión igual al el de la junta, se tiene que a 20°C el voltaje producido en la unión es: 0,798mV. Los voltajes entregados por una termocupla tipo K se muestra en el **ANEXO 7**.

El valor que se debe compensar por programa es:

Por lo tanto, el voltaje que se debe compensar es 0,798 m que representa un valor de 540 aproximadamente en el programa:

$$V_{\text{real}} = V_{\text{medido}} + V_2 \quad \rightarrow \quad V_{\text{real}} = V_{\text{medido}} + 540$$

<sup>i</sup> Los valores de termopar inferiores al valor del rango de saturación mínimo se notifican como -32768.

<sup>ii</sup> Los valores de termopar superiores al valor del rango de saturación máximo se notifican como 32767.

<sup>iii</sup> El error de la unión fría interna es de ±1,5 °C en todos los rangos. Esto debe añadirse al error en esta tabla. Para cumplir estas especificaciones, la Signal Board requiere como mínimo 30 minutos de calentamiento.

Además se utilizó un pirómetro como medidor auxiliar de temperatura, para comprobar las mediciones.

### 3.1.5 MEDICIÓN MONÓXIDO DE CARBONO

Entre los principales requerimientos del sensor de CO encontramos su rango de medida 0 ppm a 1000 ppm, temperatura de proceso 200 °C, salida eléctrica normalizada en voltaje o corriente.

Al momento del diseño no se encontró un sensor industrial en el mercado que satisfaga las condiciones, se optó por adquirir un sensor de CO serie MQ-7 que cumple con los requerimientos eléctricos y rango de medida, sin embargo no soporta temperaturas altas de trabajo razón por la que se instaló en una zona donde los gases circulan a menor temperatura y es necesario su reemplazo después de un determinado tiempo de vida útil. El elemento sensor está compuesto por SnO<sub>2</sub> y varía su conductividad cuando la concentración de monóxido de carbono en el aire cambia, su principal ventaja es su sensibilidad y rapidez de respuesta. Los datos técnicos se especifican a continuación:

Tabla 3.5. Datos Técnicos Sensor de CO MQ-7 [36]

Modelo		MQ-7	
Tipo		Semiconductor	
Estándar encapsulado		Plástico	
Gas detección		Monóxido de Carbono	
Concentración		10 – 10000 ppm CO	
Circuito	Voltaje principal	V <sub>c</sub>	Menor o igual a 10 Vdc
	Voltaje de calentamiento	V <sub>H</sub>	5,0 ± 0,2 V Ac o Dc (Alto) 1,5 ± 0,1 V Ac o Dc (Bajo)
	Tiempo de calentamiento	T <sub>L</sub>	60 ± 1s (Alto); 90 ± 1s (Bajo)
	Resistencia de carga	R <sub>L</sub>	Ajustable
Características	Resistencia de calentamiento	R <sub>H</sub>	31Ω ± 3Ω



	Consumo de calentamiento	$P_H$	Menor o igual a 350 mW
	Resistencia detectada	$R_s$	2 K $\Omega$ – 20K $\Omega$ (100 ppm CO)
	Sensibilidad	S	$R_s$ (en aire) / $R_s$ (100 ppm CO) $\geq$ 5
	Pendiente	A	$\leq$ 0,6 ( $R_{300ppm}$ / $R_{100ppm}$ CO)
Condición	Temperatura /Humedad		20°C $\pm$ 2°C; 65% $\pm$ 5% RH
	Estándar prueba de circuito		$V_c = 5,0 \pm 0,1$ V $V_H$ (Alto) = 5,0 $\pm$ 0,1 V $V_H$ (Bajo) = 1,5 $\pm$ 0,1 V
	Tiempo precalentamiento		Sobre las 48 horas

### Características:

- Buena sensibilidad a gas combustible en un amplio rango.
- Alta sensibilidad a gas natural.
- Alta durabilidad.
- Simple circuito de control.

### Aplicación:

- Detector de fuga de gas doméstico.
- Detector Industrial de concentración de monóxido de carbono.
- Detector portable de gas.

La Figura 3.7 muestra los terminales y el circuito básico de prueba:

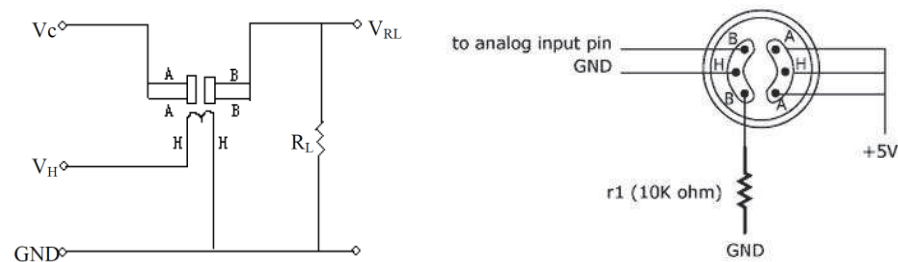


Figura 3.7 Circuito básico de prueba y circuito simple del sensor de CO MQ-7 [36]

El circuito consta de dos entradas de voltaje ( $V_C$ ,  $V_H$ ), que pueden ser alimentadas con la misma fuente;  $V_C$  se utiliza para polarizar el voltaje de salida  $V_{RL}$  y  $V_H$  representa el voltaje de calentamiento del sensor.

El comportamiento del sensor, depende de las condiciones ambientales, el factor principal su resistencia ( $R_s$ ) puede ser calculada como sigue:

$$R_s = \left( \frac{V_c}{V_{R_L} - 1} \right) \times R_L$$

Además, la potencia disipada por el sensor está dada por:

$$P_s = V_c^2 \times \frac{R_s}{(R_s + R_L)^2}$$

### Operación:

La relación entre la resistencia del sensor y la resistencia de carga está determinada por:

$$\frac{R_s}{R_L} = \frac{V_c - V_{R_L}}{V_{R_L}}$$

En la siguiente figura se muestra la variación de voltaje a la salida del sensor, observando la característica del voltaje  $V_H$ :

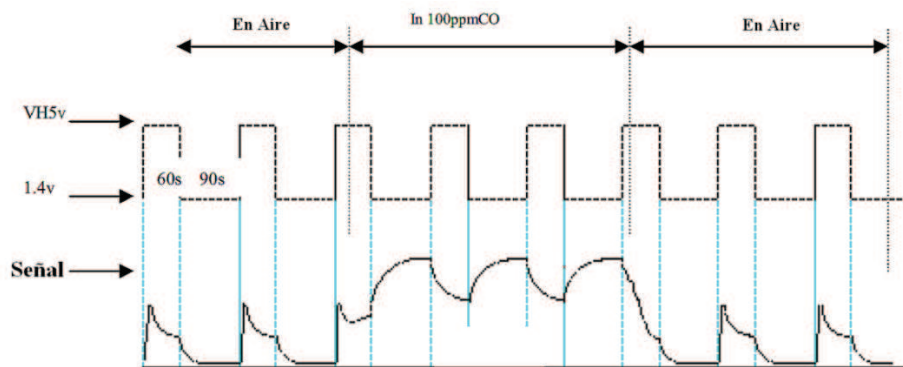


Figura 3.8 Respuesta sensor de CO [36]

La característica de sensibilidad del sensor se toma a una temperatura de 20°C, humedad del 65%, concentración de oxígeno del 21% y  $R_L=10$  kΩ.  $R_0$ , representa la resistencia del sensor a 100ppm de CO y  $R_s$  representa la resistencia del sensor a diferentes concentraciones de CO. En la curva de dependencia de la temperatura y humedad se toma como referencia una humedad relativa del 33% para  $R_0$ .

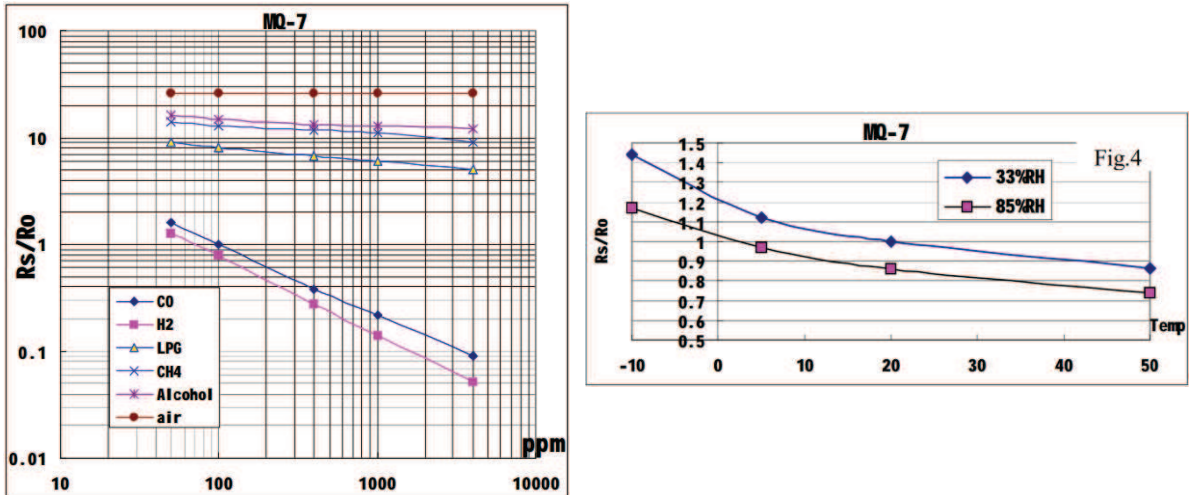


Figura 3.9. Sensibilidad y dependencia de la temperatura de sensor MQ-7 [36]

### Diseño del acondicionamiento:

- Diseño convertidor voltaje a corriente de  $0V - 5V$  a  $4mA - 20mA$ :

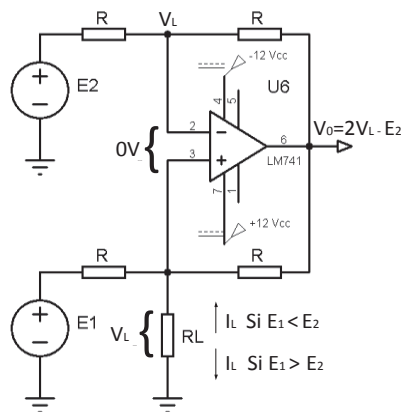


Figura 3.10 Convertidor de voltaje a corriente

En el circuito se cumple:  $I_L = \frac{E_1 - E_2}{R}$ ;  $V_L = I_L R_L$ ;  $V_0 = 2V_L - E_2$

Según el **ANEXO 4** la resistencia de entrada al módulo está comprendida entre  $280 \Omega - 315 \Omega$ , considerando un 7% de error en la resistencia del módulo se diseñará para una carga máxima de  $300 \Omega$ .

$$V_{L\min} = I_{L\min} \cdot R_L = 4 \text{ mA} \times 300 \Omega \rightarrow V_{L\min} = 1,2 \text{ V}$$

$$V_{L\max} = I_{L\max} \cdot R_L = 20 \text{ mA} \times 300 \Omega \rightarrow V_{L\max} = 6 \text{ V}$$

Consideremos:  $V_{Lm\acute{a}x} = 6\text{ V}$ , se obtiene el valor máximo de salida cuando  $E_2 = 0$ , y estará dado por:

$$V_{om\acute{a}x} = 2V_{Lm\acute{a}x} - E_2 = (2 \times 6\text{ V}) - 0\text{ V} = 12\text{ V}$$

Obtenemos un valor  $V_{om\acute{a}x}$  de 12V que es el valor de saturación de nuestro amplificador operacional por lo que no se necesita aumentar el valor de  $E_2$ .

$$V_{om\acute{a}n} = 2V_{Lm\acute{a}n} - E_2 = 2 \times 1,2\text{ V} - 0\text{ V} \rightarrow V_{om\acute{a}n} = 2,4\text{ V}$$

$$V_{om\acute{a}x} = 2V_{Lm\acute{a}x} - E_2 = 2 \times 6\text{ V} - 0\text{ V} \rightarrow V_{om\acute{a}x} = 12\text{ V}$$

El sensor MQ-7 entrega una señal variable entre 0V y 5V:

$$I_{Lm\acute{a}x.} = \frac{E_{1m\acute{a}x} - E_2}{R} \rightarrow 20\text{ mA} = \frac{5\text{ V} - 0\text{ V}}{R} \rightarrow R = \frac{5\text{ V}}{20\text{ mA}} \rightarrow R = 250\Omega$$

El circuito de acondicionamiento completo se observa en la Figura 3.11, el circuito está compuesto de 4 etapas:

- **Etapas de desacoplamiento de impedancias.**- Esta etapa consta de un circuito seguidor de tensión, se usa para evitar que la impedancia del sensor de CO cargue al circuito de acondicionamiento.
- **Etapas de regulación del valor de salida.**- Es necesario considerar la posibilidad de calibrar la señal de salida a través de un potencmetro, como se observó en el diseño de la etapa de conversión, la corriente de salida es proporcional al valor de voltaje de entrada; por esto se incorpora un circuito sumador de voltaje al voltaje de salida del sensor de CO, la ganancia de salida es unitaria.
- **Etapas de inversión de señal.**- Dado que la señal entregada por el sumador se invierte, se añade un amplificador inversor con ganancia unitaria.
- **Etapas de conversión de voltaje a corriente.**

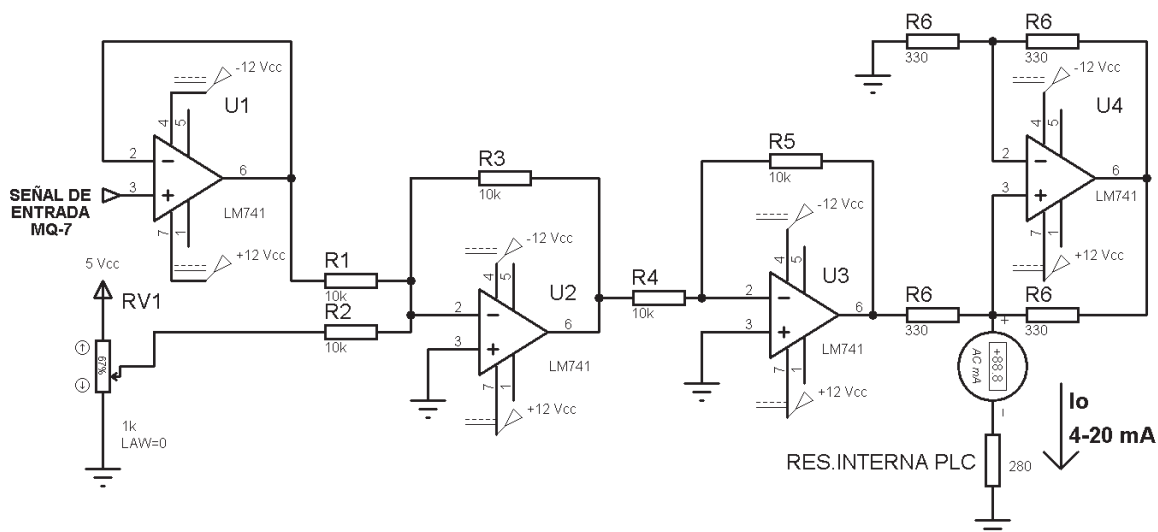


Figura 3.11. Diagrama de acondicionamiento sensor de CO

### Placas Diseñadas:



Figura 3.12. Sensor de Monóxido de carbono y placa de acondicionamiento

### 3.1.6 DESCRIPCIÓN FUNCIONAMIENTO DE DETECTORES INSTALADOS EN EL CALDERO:

La **Tabla 3.6** presenta una descripción simplificada de la respuesta de los detectores ante cambios en el estado del sistema.

Tabla 3.6. Respuesta de los detectores ante un cambio de variable.

DETECTORES	Contacto cerrado	Contacto abierto
Detector de Alta presión	Presión normal	Si sobrepasa el nivel de presión admitido
Detector de flujo de aire	Existe flujo de aire en la cámara	No existe flujo de aire en la cámara
Detector presión de aire de dispersión	Existe presión	No existe presión
Detector cierre de compuerta	Está cerrada la compuerta	Está abierta la compuerta

### 3.1.7 ACTUADORES:

Los siguientes elementos son controlados durante el funcionamiento del caldero; las características de placa se adjuntan en el **ANEXO 3**.

Tabla 3.7. Actuadores

<b>SALIDAS DIGITALES</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Fases</b>
Fuente de ignición	120 Vca	0,7 A	1
Electroválvula de gas	120 Vca	0,2 A	1
Electroválvula de combustible	120 Vca	0,2 A	1
Luz de alarma	220 Vca	0,05 A	2
Motor compresor	220 Vca	4 A	3
Motor ventilador	220 Vca	20 A	3
Motor bomba de Agua	220 Vca	20 A	3
<b>SALIDAS ANALÓGICAS</b>			
Control damper			
Control Modutrol			

### 3.1.8 CONTROL DE DAMPER:

El control del flujo de aire que ingresa a la cámara de combustión se hace mediante un damper constituido por una compuerta tal y como se describió en el capítulo 2, para girar esta compuerta se utiliza un motor de pasos, gracias a su capacidad de retener una posición, el circuito de control consta de un conversor A/D que recibe la información desde el PLC y genera los ciclos necesarios para posicionar el damper.

La **Figura 3.13** muestra el diagrama de flujo del programa implementado en el microcontrolador, para el control del motor de pasos.

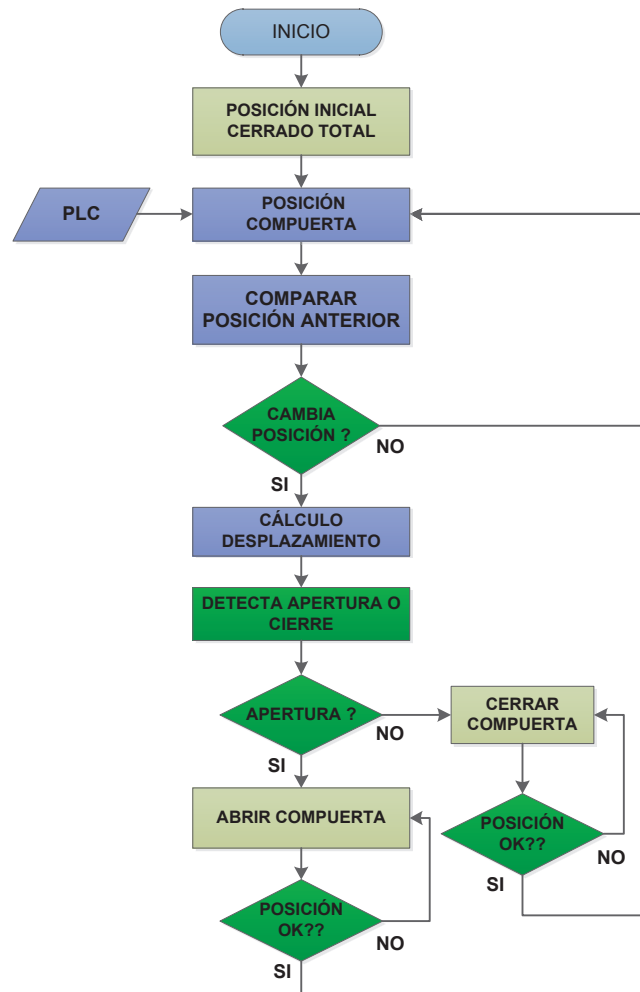


Figura 3.13 Diagrama de Flujo control de compuerta de Damper

### Motor de pasos:

El motor es controlado con una secuencia de paso doble, con el objeto de incrementar su torque; la siguiente tabla muestra algunas características de motor utilizado:



Sanyo Denki Model 103H546-0440 Stepper Motor							
Voltage (v)	Current (A/phase)	Resistance ( $\Omega$ /phase)	Inductance (mH/phase)	Holding Torque N.m (lb.in)	Rotor Inertia ( $\times 10^4$ Kg.m <sup>2</sup> )	Step Angle	Mass (Kg)
3.15	1	3.15	2.8	0.147 (1.3)	0.03	1.8°	0.2

Figura 3.14. Características de un motor de Pasos [37]

Las compuertas del damper se controlan en un rango de 0°, completamente cerrado a 90°, completamente abierto; en el programa se generan secuencias de pasos, se define una secuencia como: Secuencia = 1,8°/paso x 4 pasos = 7,2°.

El número de secuencias para completar un recorrido de 90° es:

$$\# \text{ Secuencias} = 90^\circ / 7,2^\circ = 12,5$$

El modutrol tiene 12 posiciones diferentes; el voltaje de control para cada posición es:

$$\text{Voltaje por paso} = 5V / 12,5 = 0,4 V$$

### **Cálculo de Torque**

El torque que ofrece el motor; en una primera prueba de funcionamiento no fue suficiente para mover las compuertas del damper mientras esta activo el ventilador; presenta problemas de control para ángulos menores a 40°. No se ha podido establecer el torque requerido a través de cálculos por falta de datos técnicos del ventilador, se determina en base a pruebas.

Torque del motor = 0,147 N.m

$$T_m / T_s = n_m / n_s$$

$$T_s = (n_s / n_m) \rightarrow T_m = (12 \text{ cm} / 2,5 \text{ cm}) \times 0,147 \text{ N.m}$$

$$T_s = 0,7056 \text{ N.m};$$

El damper con su ventilador activado puede moverse con un torque de 0,71 N.m.

### **3.1.9 CONTROL DE MODUTROL:**

La posición del modutrol puede ser controlada manualmente con un potenciómetro como se muestra en la siguiente figura:



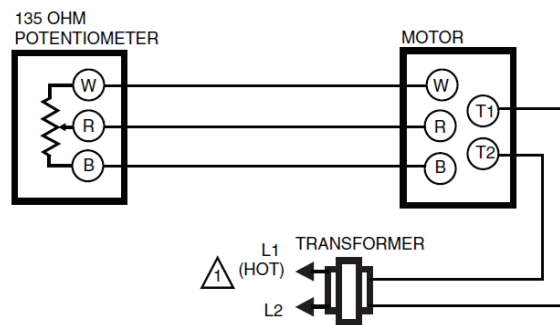


Figura 3.15 Esquema de pruebas de modutrol [27]

Es necesario tener en cuenta que el valor del potenciómetro no debe ser menor a  $135 \Omega$ , se debe limitar la corriente circulante. El control implementado cuenta con un potenciómetro digital para el control del modutrol, de la serie MCP4150 de Microchip.

### Potenciómetro Digital MCP4150

El dispositivo cuenta con 256 posiciones de un valor total de  $50 \text{ K}\Omega$ , la resistencia varía linealmente y es controlada mediante interfaz SPI. El dispositivo funciona en un rango de voltaje de  $2,7\text{V} - 5,5\text{V}$ , en un rango de temperatura industrial de:  $-40^\circ\text{C} - 85^\circ\text{C}$ . En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del circuito integrado y la distribución de sus terminales.

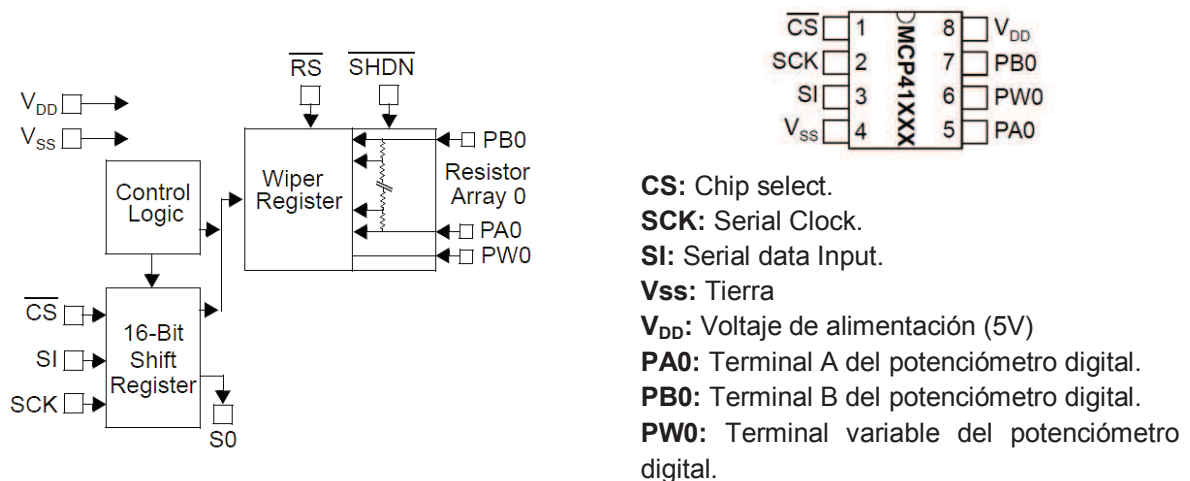


Figura 3.16 Diagrama de bloques y terminales MCP4150 [38]

El potenciómetro digital se puede configurar: como reóstato, uniendo uno de los terminales del potenciómetro al terminal variable; y como potenciómetro, se dispone de los tres terminales del elemento, esto permite obtener a la salida un

divisor de voltaje. En la **Figura 3.17** se pueden apreciar éstos modos de funcionamiento:

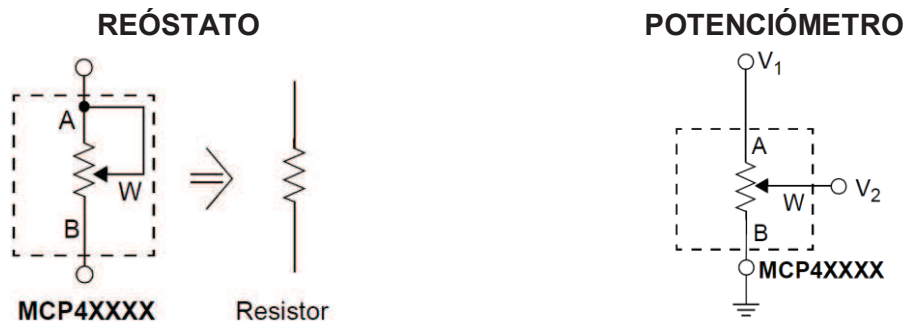


Figura 3.17 Posibles configuraciones del potenciómetro MCP 4150 [38]

- *Interface Serial:*

La comunicación entre el controlador y el potenciómetro digital MCP4150 se realiza usando la interfaz SPI. Esta interfaz cuenta con tres comandos:

- Escribir un nuevo valor en el registro de datos del potenciómetro.
- Configurar al canal en modo paro.
- Comando No operación, no realiza ningún cambio.

Para ejecutar un comando, el terminal CS debe estar en  $0_L$  seguido de los 16 bits que corresponden a una trama, 1 byte de comandos y 1 byte de datos, que se ingresan sincrónicamente con los pulsos de reloj, el comando es ejecutado cuando el terminal CS es puesto nuevamente en  $1_L$ . Los datos son ingresados al dispositivo en cada flanco de subida de la señal de reloj. El dispositivo controla el número de pulsos de reloj mientras CS es bajo y rechaza los comandos y datos recibidos si el número de pulsaciones no es múltiplo de 16.

Es siempre el primer byte que se ingresa, este comando contiene dos bits de selección de comando y dos bits de selección de potenciómetro para el caso de los dispositivos que contienen dos potenciómetros, para el caso estos bits no tienen mayor influencia en el funcionamiento.

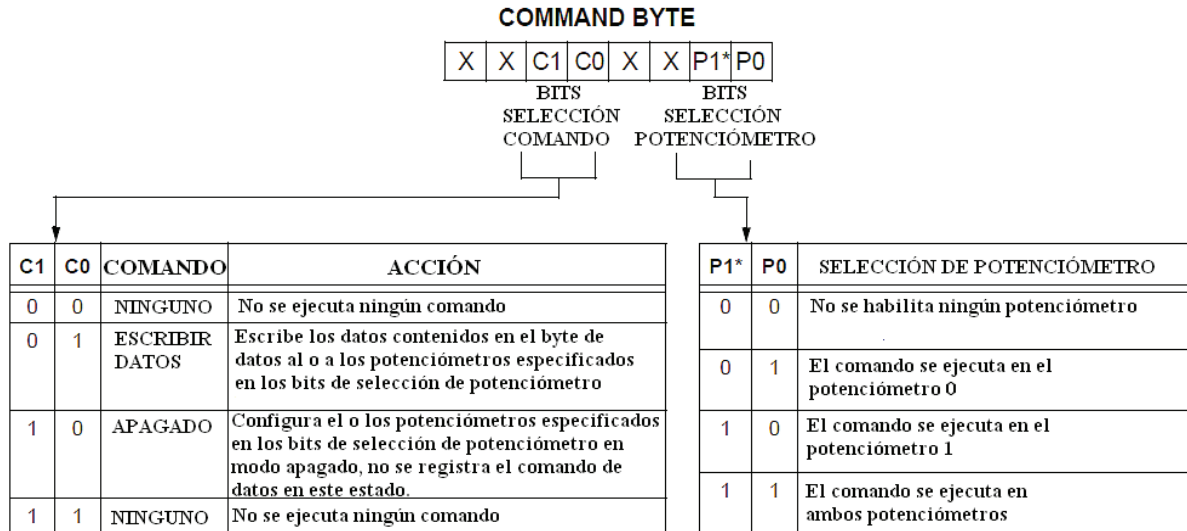


Figura 3.18 Descripción Byte de comandos [38]

Cuando un nuevo dato va a ser escrito en el registro del potenciómetro, lo antecede el byte de comando con los valores: C1= 0, C0=1; para el caso del dispositivo con dos potenciómetros se selecciona uno de ellos y se escribe el nuevo dato. El comando apagado permite configurar el dispositivo en modo de ahorro energético, en este modo el terminal A es un circuito abierto y los terminales B y W se cortocircuitan. En la siguiente figura se puede observar el proceso de comunicación:

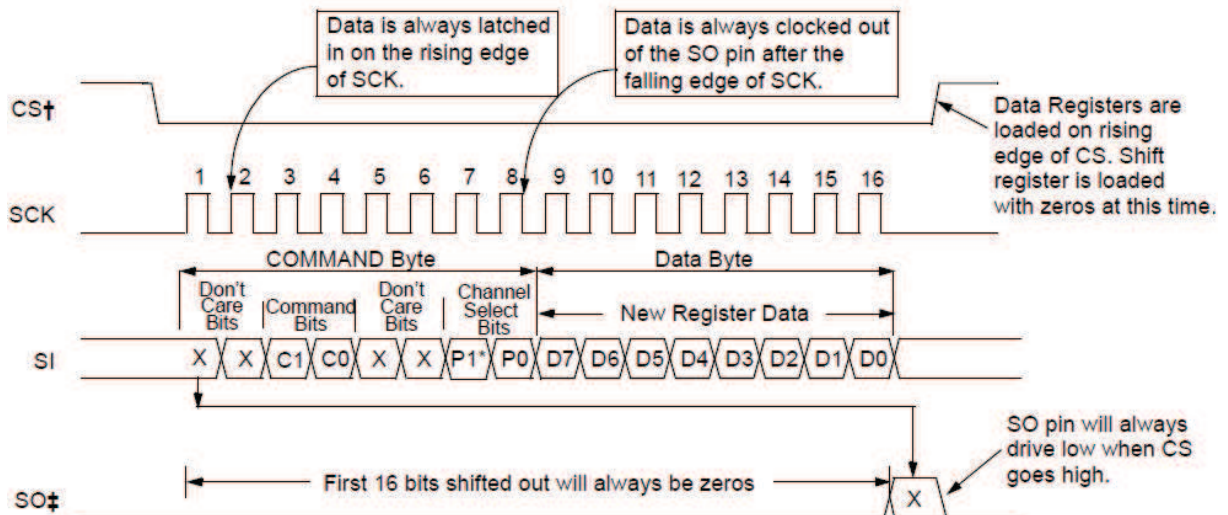


Figura 3.19 Diagrama de tiempo escritura instrucciones o nuevos datos. [38]

Para cambiar el valor resistivo del potenciómetro, se envía un nuevo byte de datos.

La **Figura 3.20** muestra la variación de resistencia del potenciómetro en función de los datos del registro del elemento y también la influencia de la temperatura en el elemento.

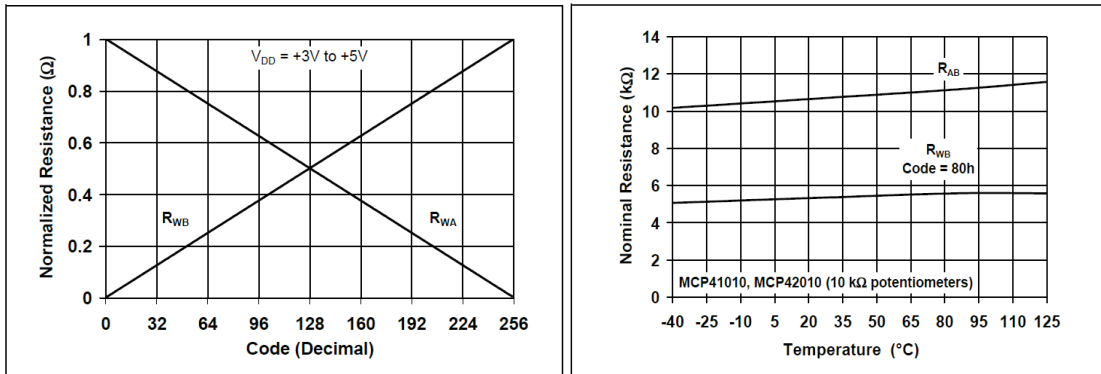


Figura 3.20 Variación de resistencia ante variaciones de temperatura. [38]

El circuito de control posee un convertor A/D, recibe una señal análoga del PLC y se crea el código respectivo del potenciómetro digital para posicionar el modutrol. La **Figura 3.21** muestra el diagrama de flujo correspondiente.

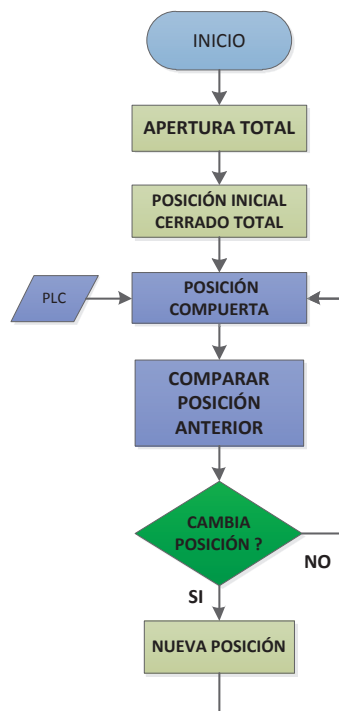


Figura 3.21 Diagrama de Flujo control de posición de Modutrol Honeywell

### 3.1.10 CIRCUITO DE CONTROL:

El control para los actuadores descritos, Modutol y Damper, se han implementado con un microcontrolador ATMEGA8A, la Figura 3.22 muestra el diagrama el circuito diseñado.

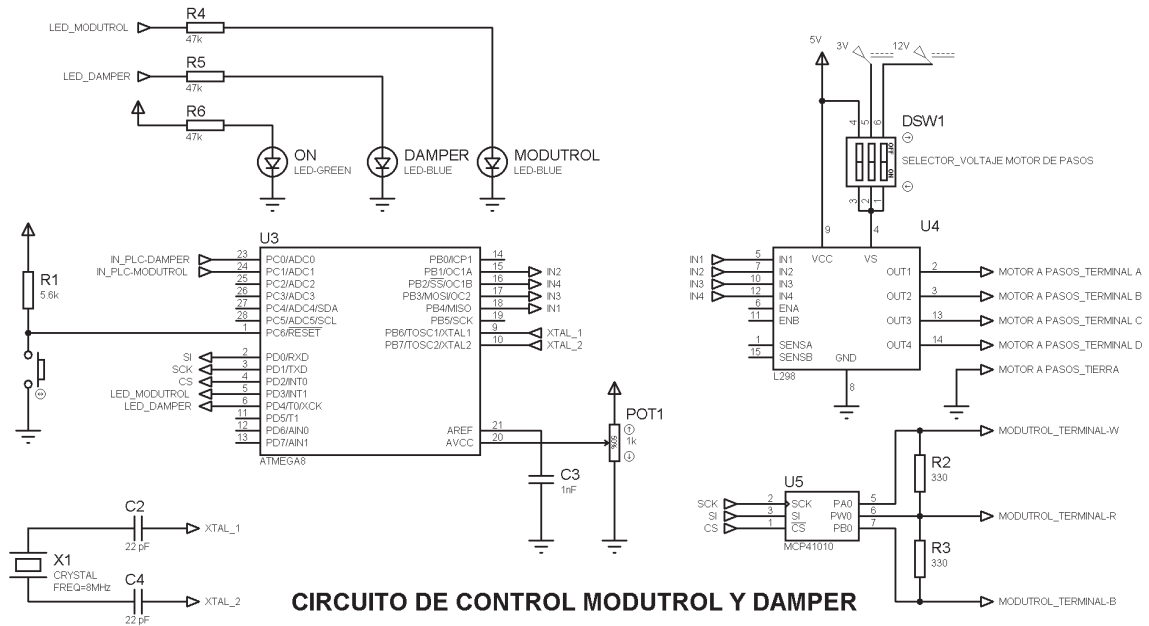


Figura 3.22 Diagrama de control Modutrol y Damper

La Figura 3.23 muestra la placa realizada.

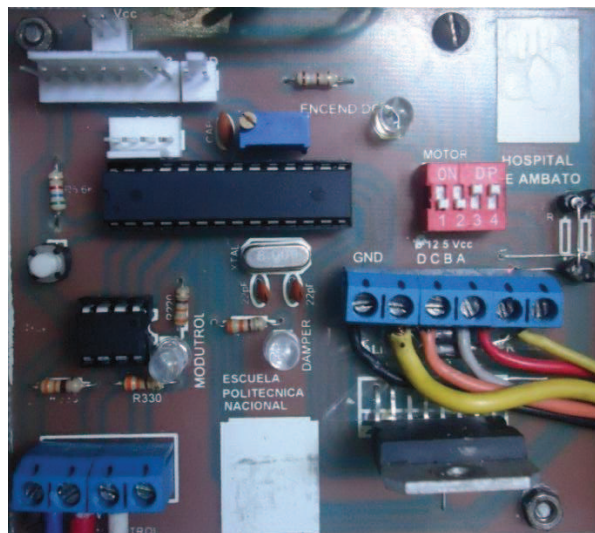


Figura 3.23. Placa de control Modutrol y Damper

### 3.2 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

El programa principal de control del caldero 3 del IESS Hospital de Ambato se implementó en un controlador lógico programable S7-1200 modelo CPU 1212C AC/DC RLY de la marca SIEMENS, el PLC ofrece flexibilidad y capacidad de controlar una gran variedad de dispositivos para distintas tareas de automatización. La CPU incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, así como circuitos de entrada.

Una vez cargado el programa en la CPU, ésta contiene la lógica necesaria para vigilar y controlar los dispositivos de la aplicación. La CPU vigila las entradas y cambia el estado de las salidas según la lógica del programa de usuario, que puede incluir lógica booleana, instrucciones de contaje y temporización, funciones matemáticas complejas, así como comunicación con otros dispositivos inteligentes. Numerosas funciones de seguridad protegen el acceso tanto a la CPU como al programa de control:

- Toda CPU ofrece protección por contraseña que permite configurar el acceso a sus funciones.
- Es posible utilizar la "protección de know-how" para ocultar el código de un bloque específico.

La CPU incorpora un puerto PROFINET para la comunicación en una red PROFINET, para el caso se utiliza este puerto para comunicar el PLC con el panel de usuario. Además cuenta con módulos de comunicación, disponibles para la comunicación en redes RS485 o RS232. [34]

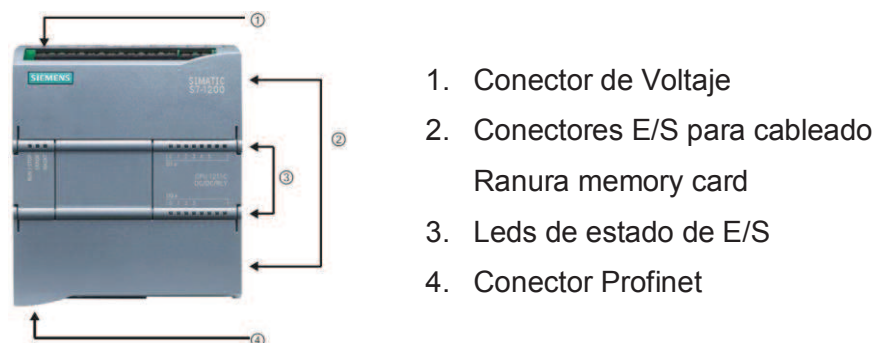


Figura 3.24 Distribución partes del PLC Siemens S7-1200 1212C [34]

Para la aplicación, adicionalmente al PLC se agrega:

- **1 Signal Board:** Se utiliza para agregar entradas o salidas digitales o analógicas en el PLC, se inserta en la parte frontal del mismo, para el caso se agrega un Signal Board de una entrada analógica que posee el acondicionamiento necesario para determinar la temperatura del vapor medida a partir de una termocupla tipo K. Es necesario tener en cuenta que para utilizar esta SB el firmware de la CPU debe tener la versión 2.0 o superior.

El módulo de señales analógicas de termopar SB 1231 (TC) mide el valor de la tensión conectada a las entradas del módulo. El tipo de medición de temperatura puede ser "termopar" o "tensión".

- Termopar: el valor se expresará en grados multiplicados por diez (25,3 grados se expresarán como 253 decimales).
- Tensión: el valor máximo del rango nominal serán 27648 decimales.

En la **Figura 3.25** se muestra la configuración de conexión del módulo:

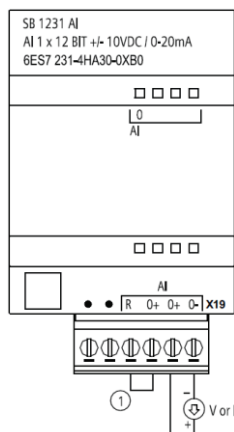


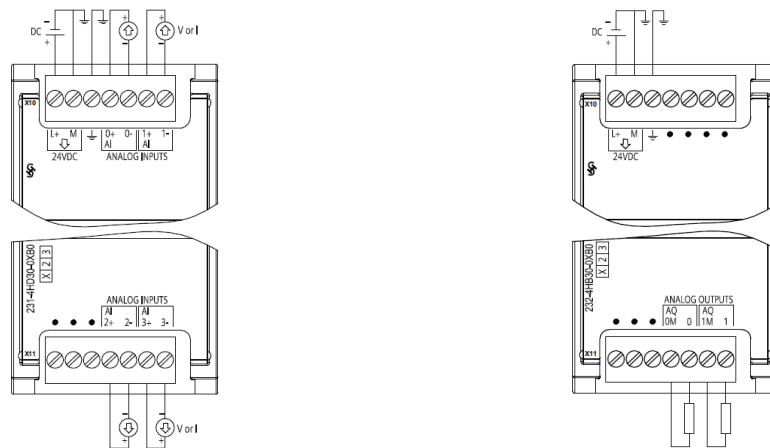
Figura 3.25 Conexión entre termocupla y Signal Board [34]

- **2 Módulos de señal:** Los módulos de señales se utilizan para agregar funciones a la CPU. Los módulos de señales se conectan a la derecha de la CPU. Se han agregado los siguientes módulos:
  - **1 Módulo de 4 entradas analógicas SM 1231:** Tiene una resolución de 13 bits, se puede configurar como entradas de corriente (0-20 mA) o voltaje ( $\pm 2,5V$ ,  $\pm 5V$ ,  $\pm 10V$ ); la configuración se realiza en pares, es decir, si se configura la

entrada 0 la misma configuración se aplica a la entrada 1, asimismo la configuración de la entrada 2 aplica a la entrada 3.

- **1 Módulo de 2 Salidas analógicas SM:** Tiene una resolución de 14 bits, se pueden configurar como salidas de voltaje ( $\pm 10V$ ) o corriente (0-20mA). La configuración se realiza de forma individual. La **Figura 3.26** muestra la conexión de entradas a los respectivos módulos.

El Step 7 Basic, proporciona bloques lógicos para el monitoreo de estado de cada módulo, se puede configurar: para una señal de voltaje el diagnóstico por cortocircuito y para una señal de corriente el diagnóstico por rotura de hilo.



Módulo 4 entradas analógicas SM 1231      Módulo 2 salidas analógicas SM 1232

Figura 3.26 Conexión entradas y salidas a módulos E/S analógicas [34]

Adicionalmente, la gama S7-1200 provee módulos de comunicación (CMs) que ofrecen más funciones para el sistema. Hay dos módulos de comunicación, a saber: RS232 y RS485, que serán únicamente mencionados pues no son parte del proyecto. Las características técnicas del PLC, Signal Board y módulos se pueden encontrar en el **ANEXO 4**.

### 3.2.1 TIA PORTAL

El Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) integra diferentes productos SIMATIC en una aplicación de software, lo que facilita la implementación del sistema. Dentro del TIA Portal, los productos TIA interactúan entre sí, ofreciéndole



soporte en todas las áreas implicadas en la creación de una solución de automatización. Una solución de automatización típica abarca lo siguiente:

- Un controlador que controla el proceso con la ayuda del programa.
- Un panel de operador con el que se maneja y visualiza el proceso.

Con el TIA Portal se configura tanto el control como la visualización en un sistema de ingeniería unitario. Todos los datos se guardan en un proyecto. Los componentes de programación (STEP 7) y visualización (WinCC) no son programas independientes, sino editores de un sistema que accede a una base de datos común. Todos los datos se guardan en un archivo de proyecto común.

Para todas las tareas se utiliza una interfaz de usuario común desde la que se accede en todo momento a todas las funciones de programación y visualización.

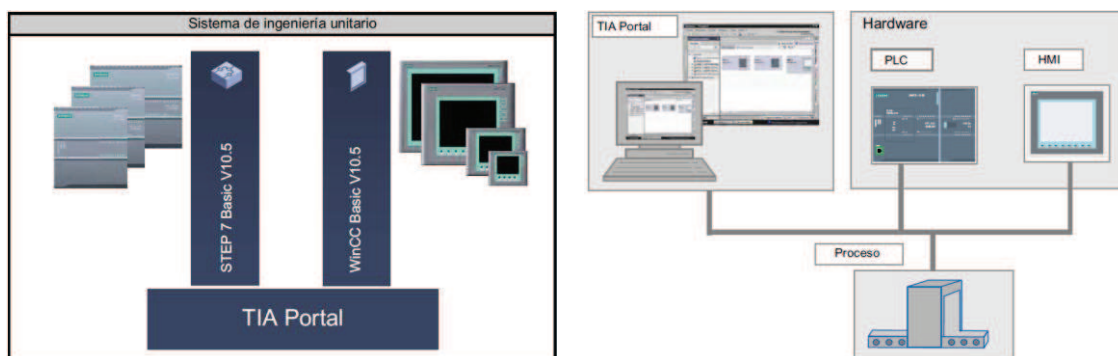


Figura 3.27. Esquema de Organización TIA Portal V11. [39]

### 3.2.2 STEP 7 BASIC

El software STEP 7 Basic ofrece un entorno amigable que permite desarrollar, editar y observar la lógica del programa necesaria para controlar una aplicación, incluyendo herramientas para gestionar y configurar todos los dispositivos del proyecto, tales como PLCs y dispositivos HMI. STEP 7 Basic ofrece varios lenguajes de programación (KOP, FUP, SCL). Asimismo, incluye las herramientas para crear y configurar los dispositivos HMI en el proyecto. [34]

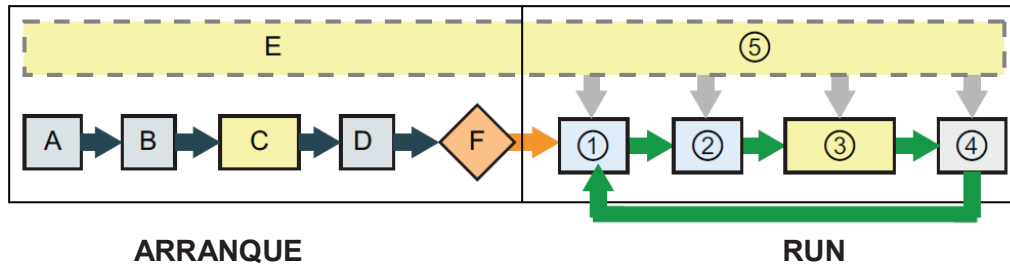
La CPU soporta los siguientes tipos de bloques lógicos que permiten estructurar eficientemente el programa de usuario:

- **Bloques de organización (OBs).**- definen la estructura del programa. Algunos OBs tienen reacciones y eventos de arranque predefinidos. No obstante, también es posible crear OBs con eventos de arranque personalizados.
- **Las funciones (FCs) y los bloques de función (FBs).**- contienen el código de programa correspondiente a tareas específicas o combinaciones de parámetros. Cada FC o FB provee parámetros de entrada y salida para compartir datos con el bloque desde el cual se usan. Un FB utiliza también un bloque de datos asociado (denominado DB instancia) para conservar el estado de valores durante la ejecución que pueden utilizar otros bloques del programa.
- **Los bloques de datos (DBs).**- almacenan datos que pueden ser utilizados por los bloques del programa. [34]

La CPU tiene tres estados operativos, a saber: STOP, ARRANQUE y RUN. Los LEDs de estado en el frente de la CPU indican el estado operativo actual.

- En estado operativo STOP, la CPU no ejecuta el programa. Entonces es posible cargar un proyecto en la CPU.
- En estado operativo ARRANQUE, los OBs de arranque (si existen) se ejecutan una vez.
- Los eventos de alarma no se procesan durante la fase de arranque del estado operativo RUN.
- El ciclo se ejecuta repetidamente en estado operativo RUN. Los eventos de alarma pueden ocurrir y procesarse en cualquier fase del ciclo del programa. En estado operativo RUN no es posible cargar proyectos en la CPU.

En la siguiente figura se observa la secuencia de ejecución del programa de usuario:



- |   |   |
|---|---|
| <p><b>ARRANQUE</b></p> <p>A Borra el área de memoria I</p> <p>B Inicializa las salidas con el último valor o el valor sustitutivo</p> <p>C Ejecuta los OBs de arranque</p> <p>D Copia el estado de las entradas físicas en la memoria I</p> <p>E Almacena los eventos de alarma en la cola de espera que deben procesarse en estado operativo RUN</p> <p>F Habilita la escritura de la memoria Q en las salidas físicas</p> | <p><b>RUN</b></p> <p>① Escribe la memoria Q en las salidas físicas</p> <p>② Copia el estado de las entradas físicas en la memoria I</p> <p>③ Ejecuta los OBs de ciclo</p> <p>④ Realiza autodiagnóstico</p> <p>⑤ Procesa alarmas y comunicaciones en cualquier parte del ciclo</p> |
|---|---|

Figura 3.28 Ejecución de programa de usuario [34]

### 3.3 DESCRIPCIÓN CONSTRUCTIVA DEL SISTEMA:

El PLC recibe las señales descritas anteriormente por parte de cada uno de los sensores y contactos digitales conectados a él.

Para realizar el control de combustión, se verifica el estado de cada sensor y tras verificar condiciones seguras de funcionamiento, el PLC lee las entradas analógicas de presión y concentración de Monóxido de Carbono, valores que ingresan a un control PID que posicionará Modutrol y Damper respectivamente; para esto, se utiliza el circuito de control descrito anteriormente, el PLC entrega una señal analógica variable y el circuito posiciona el actuador correspondiente.

El PLC cuenta con dos canales de salida digitales, el primero se utiliza a 110VAC, controla la fuente de ignición, válvula de diesel, válvula de gas, y un relé que activa la alarma por fallo; el otro canal usa 220Vca, activa 2 contactores para accionar los motores del ventilador y compresor.

Además el sistema de calderos del IESS cuenta con un tablero de programación de funcionamiento, el cual controla el encendido temporizado de cada uno de los calderos. La **Figura 3.29** muestra el diagrama de entradas y salidas del PLC.

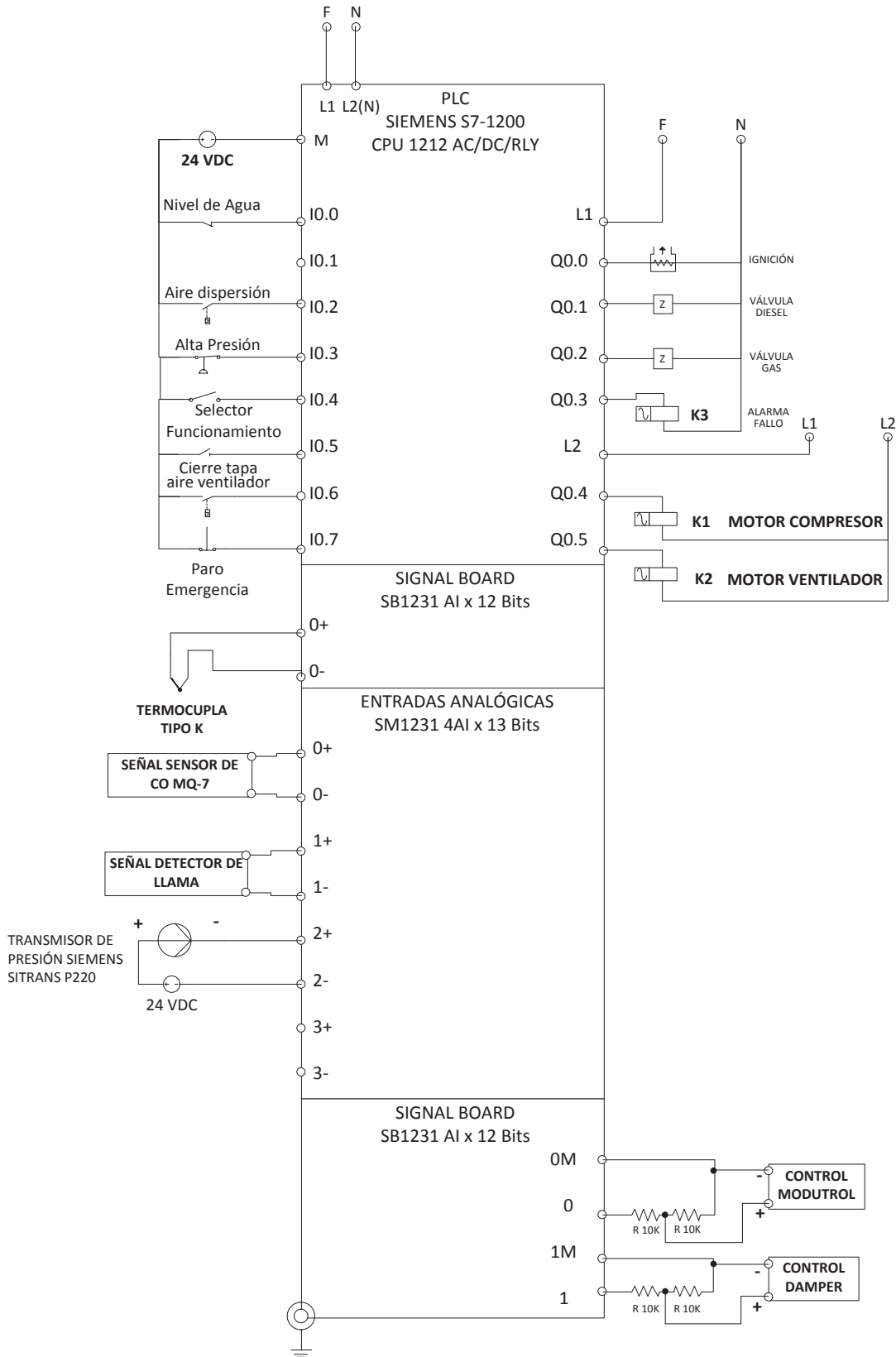


Figura 3.29. Diagrama de entradas y salidas al PLC

### 3.4 TABLERO DE CONTROL

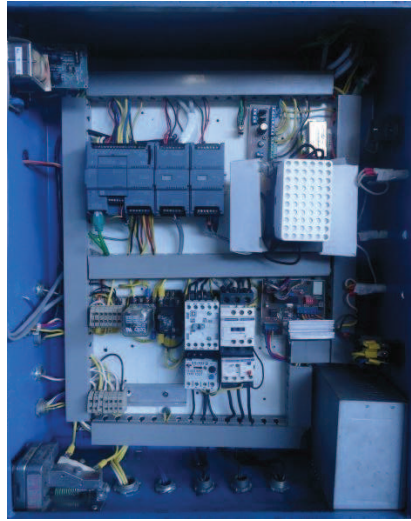


Figura 3.30. Tablero de Control del sistema

### 3.5 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE CONTROL:

Como se mencionó anteriormente el PLC soporta varios tipos de bloques lógicos, para el programa principal se utiliza un bloque lógico de organización, ejecuta las operaciones centrales de funcionamiento, organiza la ejecución ordenada de cada función, se debe tener en cuenta que un bloque de este tipo tiene la menor prioridad en la ejecución de programa; esto significa que, si durante la ejecución del bloque de organización se encuentra un llamado a un bloque de función se detiene la ejecución del bloque de organización hasta que se complete la ejecución de dicha función. En el programa principal se consideran los algoritmos generales de funcionamiento así tenemos:

- Activación o desactivación del sistema.- Depende del selector general de habilitación y del panel de control.
- Modo de control.- Se programa un modo de funcionamiento: prueba, manual, semiautomático, automático.
- Detección de entradas analógicas y digitales.- acondicionamiento de valores analógicos medidos por los sensores para usarse y desplegarse en el panel del operador, definición de entradas digitales.
- Detección de condiciones seguras de funcionamiento.- Se deben comprobar previo y durante todo el funcionamiento del caldero; esto es, verificar que la

presión este dentro de los límites permisibles, el nivel de agua contenido sea suficiente, la cubierta de la cámara de combustión esté totalmente cerrada, no se haya activado el pulsador de paro de emergencia, no se haya detectado sobrepresión en la línea de aire.

- Detección de alarmas.- Si durante el funcionamiento no se cumple las condiciones seguras.
- Detección de presión.- Se trabaja entre dos límites de presión, normalmente en el rango: 80 PSI - 100 PSI. Se implementa un algoritmo de detección de presión mínima para el encendido del caldero y detección de presión superior para el apagado del caldero.
- Tipo de Apagado del caldero.- Se apaga normalmente cuando no han existido fallos que requieran un apagado forzoso, si se abre la compuerta, existe sobrepresión (120 PSI) o se presiona el botón paro de emergencia. Un apagado normal difiere al apagado emergente en que el primero realiza un barrido de aire luego de parar la combustión y el flujo de combustible hacia la cámara, esto con el fin de evitar la acumulación de residuos en la cámara.

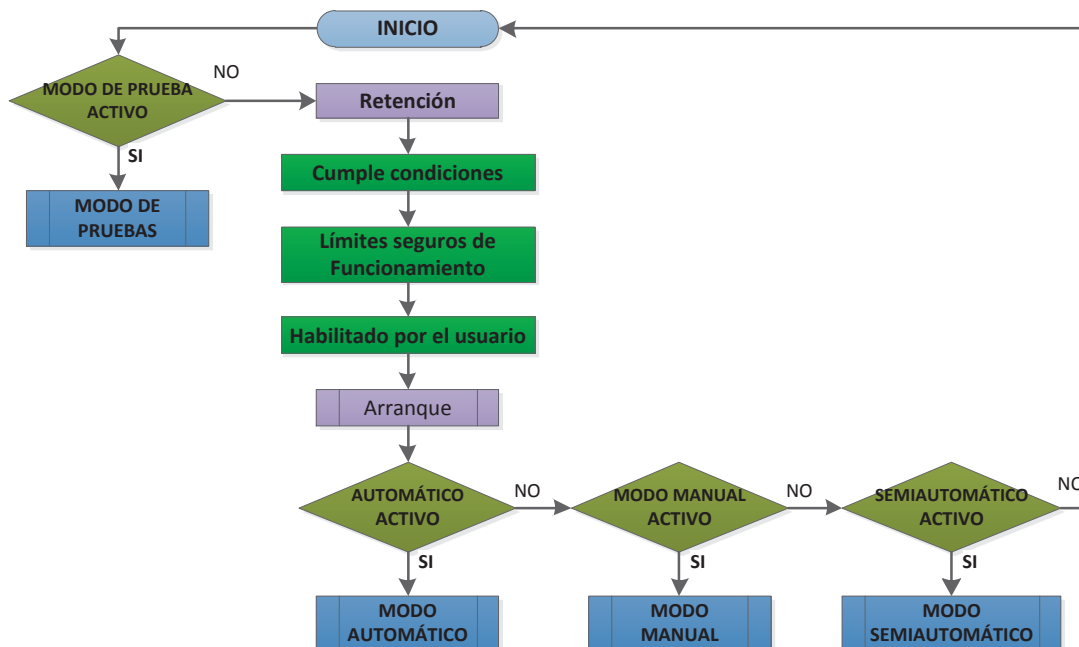


Figura 3.31. Diagrama de flujo programa principal

La **Figura 3.31** presenta el diagrama de flujo del programa principal del PLC, en modo de funcionamiento normal, el estado de retención verifica que se cumplan

las condiciones iniciales seguras; luego se verifican los límites de las variables controladas para iniciar un nuevo ciclo de funcionamiento.

### 3.5.1 MODO DE PRUEBA:

El modo de prueba tiene mayor jerarquía dentro del funcionamiento y contiene acceso restringido pues no cuenta con autoprotección, manualmente se puede controlar cada una de las partes constitutivas del sistemas con el fin de facilitar el diagnóstico de problemas y calibración del sistema. En modo de pruebas se puede activar/ desactivar manualmente el ventilador, compresor, probar el movimiento a pasos del modutrol y damper, además se puede probar el arranque del caldero, mediante la prueba de encendido.

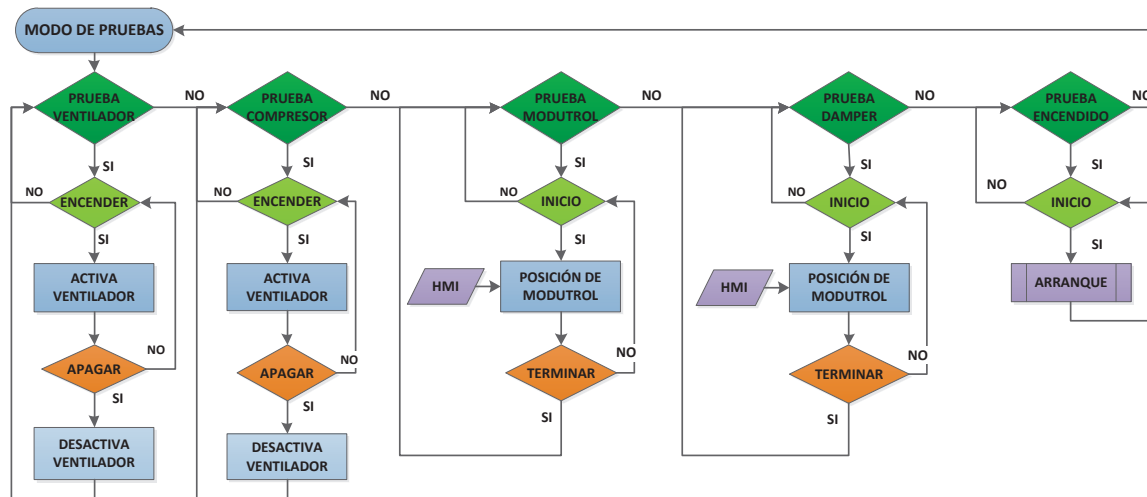


Figura 3.32. Diagrama de flujo modo de prueba

Los tres modos de funcionamiento restantes comparten el encendido, uno de ellos se activará cuando se escoja el modo de funcionamiento y sea habilitado correctamente, entonces el programa tiene un tiempo de retención, en donde permanece hasta que se satisfagan las condiciones de seguridad, luego de ello se revisan los límites de presión y cada medida de los sensores analógicos, para comprobar su debido funcionamiento, principalmente la presión; el caldero no se activa si la presión es mayor a la presión máxima programada y si supera los 120 PSI se bloquea a apagado, a través de un detector de presión. Luego de ellos se revisa una vez más las condiciones de encendido y habilitación, para después iniciar con el encendido del caldero, una vez iniciada la combustión

correctamente, se regula la proporción aire/combustible según el modo de funcionamiento elegido.

### **3.5.2 ARRANQUE:**

El arranque se diseña tomando como referencia el control Honeywell, mediante experimentación y criterios de un técnico especialista en calderos, se han regulado los tiempos de encendido. Se debe considerar que el caldero posee un sistema de combustión mixto (gas y diesel), por el tipo de fuente de ignición instalado, utiliza un transformador de 6.000V en el secundario para producir la chispa, la energía producida sirve para iniciar la combustión únicamente de GLP.

Antes de iniciar con el arranque se verifican todas las condiciones de funcionamiento, las habilitaciones y seguridades, se verifican todas las entradas del PLC cuyo estado es único mientras el caldero está apagado, que no se detecte falla en el sensor de llama, luego se retarda el inicio por 5 segundos, se abre totalmente el damper y modutrol con el objeto de hacer un barrido inicial con aire al caldero y verificar el libre movimiento de los actuadores, se crea un retardo de 5 segundos hasta que se alcance la posición de apertura total y se enciende el ventilador de aire y el compresor de aire/combustible, se esperan 5 segundos hasta la estabilización del flujo de aire y verifica que el detector de flujo de aire confirme la presencia de aire en la cámara de combustión, caso contrario se suspende el inicio. En estas condiciones se inicia una pre-purga tanto de la cámara de combustión como del inyector de combustible por medio del compresor durante 35 segundos, luego de ello, tanto el modutrol como el damper se posicionan a bajo fuego, corresponde a la apertura mínima de diesel y aire para iniciar la combustión, la conducción a bajo fuego tiene una duración de 10 segundos, luego de ello se verifica el estado de las entradas, si no ocurren problemas se activa la fuente de ignición, 1 segundo después se activa la electroválvula de gas durante 5 segundos, se verifica si el sensor detecta llama (llama piloto), si no lo hace se apaga, caso contrario activa la electroválvula de diesel y desactiva la fuente de ignición, espera 2 segundos más y verifica que se haya establecido la llama principal (diesel), de ser así desactiva la válvula de gas



se procede con el bloque de control de combustión elegido por el usuario, caso contrario el caldero se apaga por fallo.

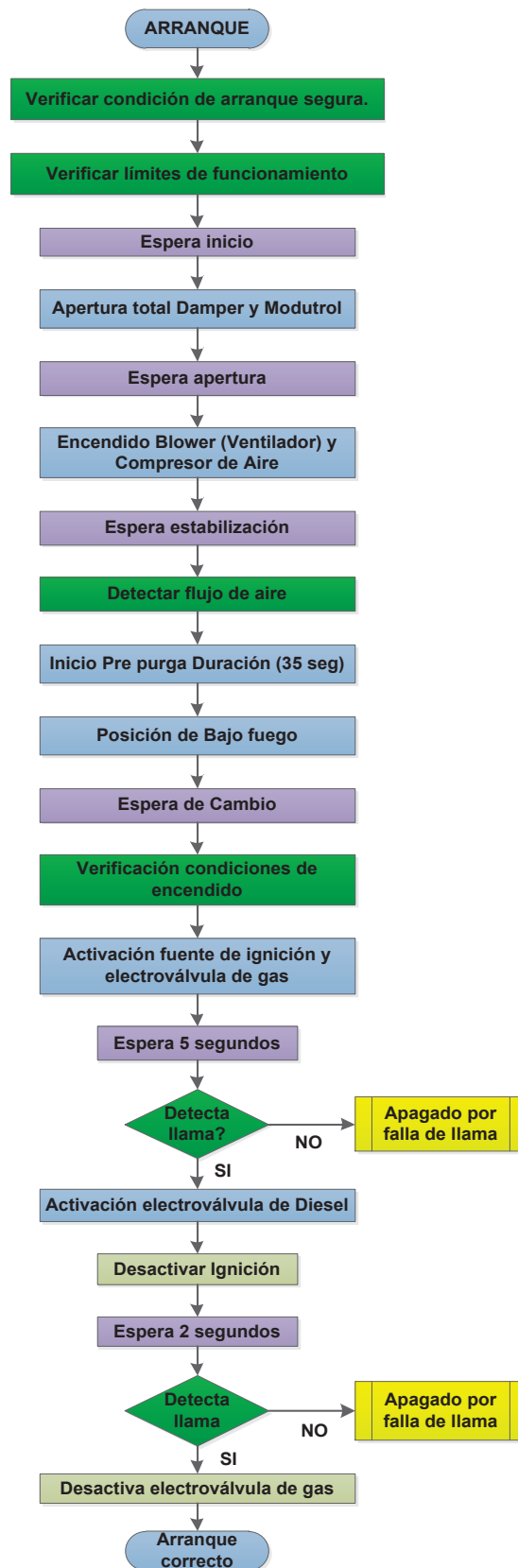


Figura 3.33. Diagrama de Flujo Arranque

Para los tres modos de funcionamiento que se describen a continuación la presión de apagado es la presión máxima configurada en el dispositivo, originalmente se la configura en 100 PSI, se debe tomar en cuenta que la presión límite del sistema para el sensor continuo es 120 PSI, además cuenta con un presostato calibrado a 130 PSI y adicional a ellos las válvulas mecánicas de seguridad calibradas a 150 PSI.

El encendido se realiza automáticamente cuando el valor de presión descienda del valor mínimo configurado por el usuario. Los modos de funcionamiento están relacionados con la regulación de combustión, si es automática la regulación del damper y modutrol se realiza automáticamente. La protección durante el encendido además de las señaladas anteriormente es que se detecte llama, en caso de no detectarse el caldero se apaga.

### 3.5.3 MODOS DE FUNCIONAMIENTO:

**Modo manual.-** En modo manual la relación aire/combustible está determinada directamente por la posición que configure el operador para el damper y modutrol, respectivamente. La posición de los actuadores se define desde el HMI.

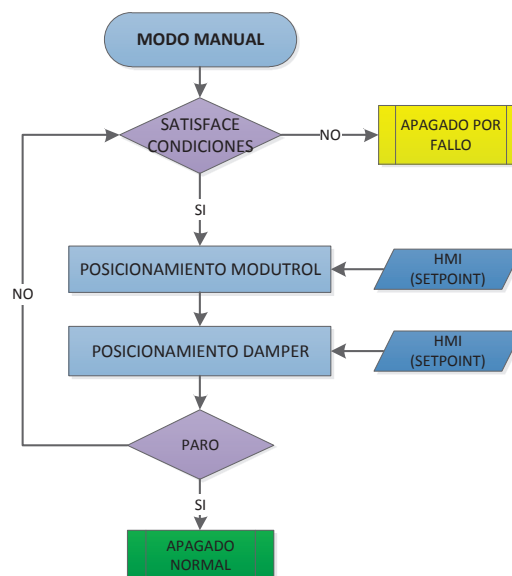


Figura 3.34. Diagrama de Flujo Funcionamiento Manual

**Modo Semiautomático.-** En este modo de funcionamiento se implementa un control PID de presión, el control actúa desde que se enciende a la presión mínima hasta

que se apaga en la presión máxima, de acuerdo a la posición del modutrol el programa determina la posición del damper para lograr una combustión completa. La posición del damper establecida para cada posición del modutrol, se ha determinado de forma experimental.

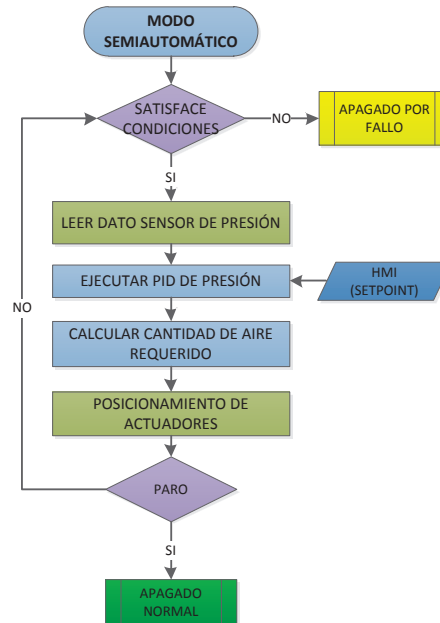


Figura 3.35. Diagrama de Flujo funcionamiento Semiautomático

**Modo Automático.-** Este modo de funcionamiento realiza un control PID de presión para posicionar el modutrol, y un control PID en función del Monóxido de carbono producido en los gases y calcula la posición del damper para que las concentraciones se mantengan en el rango de control establecido.

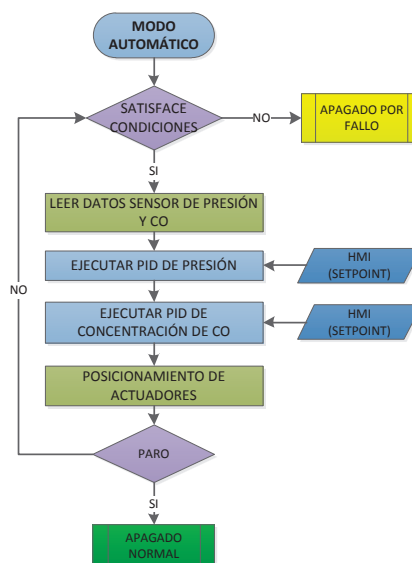


Figura 3.36. Diagrama de Flujo Funcionamiento Automático

### 3.5.4 APAGADOS:

El apagado de un caldero normal realiza una post purga para recorrer los residuos, el sistema apaga normalmente el caldero con las siguientes excepciones:

- Se ha presionado el botón paro de emergencia.
- Se ha detectado sobrepresión.
- Se ha abierto la compuerta de la cámara de combustión, En cuyo caso se apagará totalmente.

Si se produce un apagado por fallo, el sistema reiniciará hasta 3 veces para evitar paros innecesarios, en caso de sobrepasar este límite el sistema activa la señal de fallo de caldero, caso en el que se bloquea el funcionamiento del caldero hasta que el operador resetee manualmente el sistema.

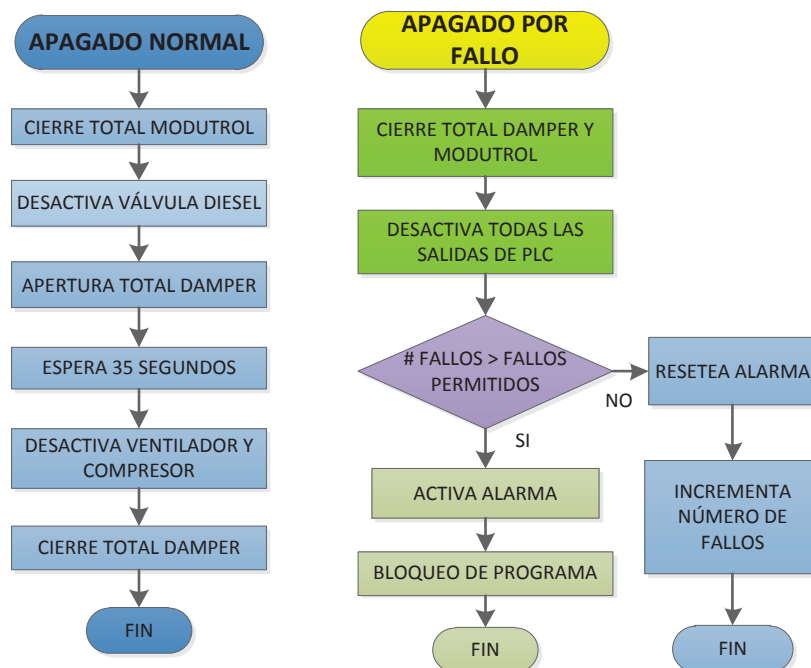


Figura 3.37. Diagramas de Flujo Apagado del caldero

## 3.6 ARRANQUE DE PROGRAMA

Es importante considerar el comportamiento del controlador ante una conexión de su alimentación, ya sea por corte de suministro eléctrico o corte manual por parte

del operario; para ello la serie de PLC'S Siemens S7-1200, posee modos de arranque, para el caso se utiliza un tipo de arranque en caliente, el cual inicializa todas las variables no remanentes y conserva el último valor de las variables remanentes, de esta forma se asegura el funcionamiento continuo del caldero ante un corte de energía. En la figura siguiente se muestra la configuración cargada en el controlador.

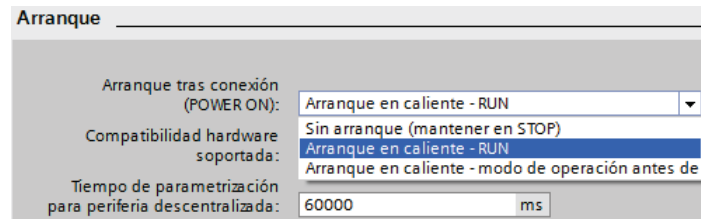


Figura 3.38. Configuración modo de Arranque del PLC [40]

### 3.7 CONTROL PID

Un control PID configurado apropiadamente, alcanza el valor de referencia configurado por el operario tan rápido como sea posible y lo mantiene en un valor constante, para el caso se utiliza el control PID para optimizar el tiempo de funcionamiento del caldero. En la Figura 3.39 se muestran las diferencias entre algunos sistemas de control clásico:

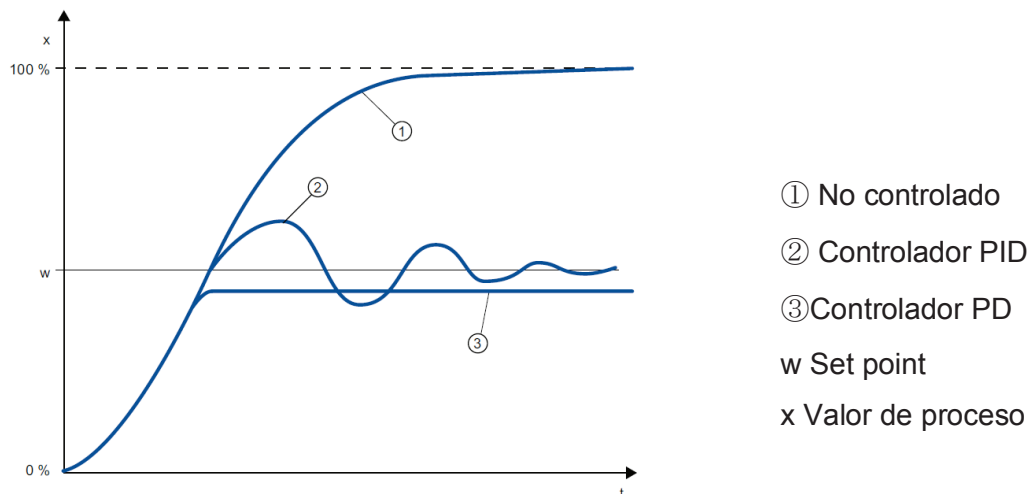


Figura 3.39. Comparación respuesta de diferentes tipos de control [40]

La ecuación que describe el algoritmo PID:

$$y = Kp \left[ (b \cdot w - x) + \frac{1}{Ti \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right]$$

Símbolo	Descripción
<b>y</b>	Valor de salida
<b>K<sub>p</sub></b>	Ganancia proporcional
<b>s</b>	Operador Laplace
<b>b</b>	Ponderación acción proporcional
<b>w</b>	Set point
<b>x</b>	Valor del proceso
<b>T<sub>i</sub></b>	Tiempo Acción integral
<b>a</b>	Coeficiente retardo derivativo ( $T_1=aT_D$ )
<b>T<sub>D</sub></b>	Tiempo de acción derivativa
<b>c</b>	Ponderación derivativa

El diagrama de bloques del control PID del S7-1200 se muestra en la Figura 3.40:

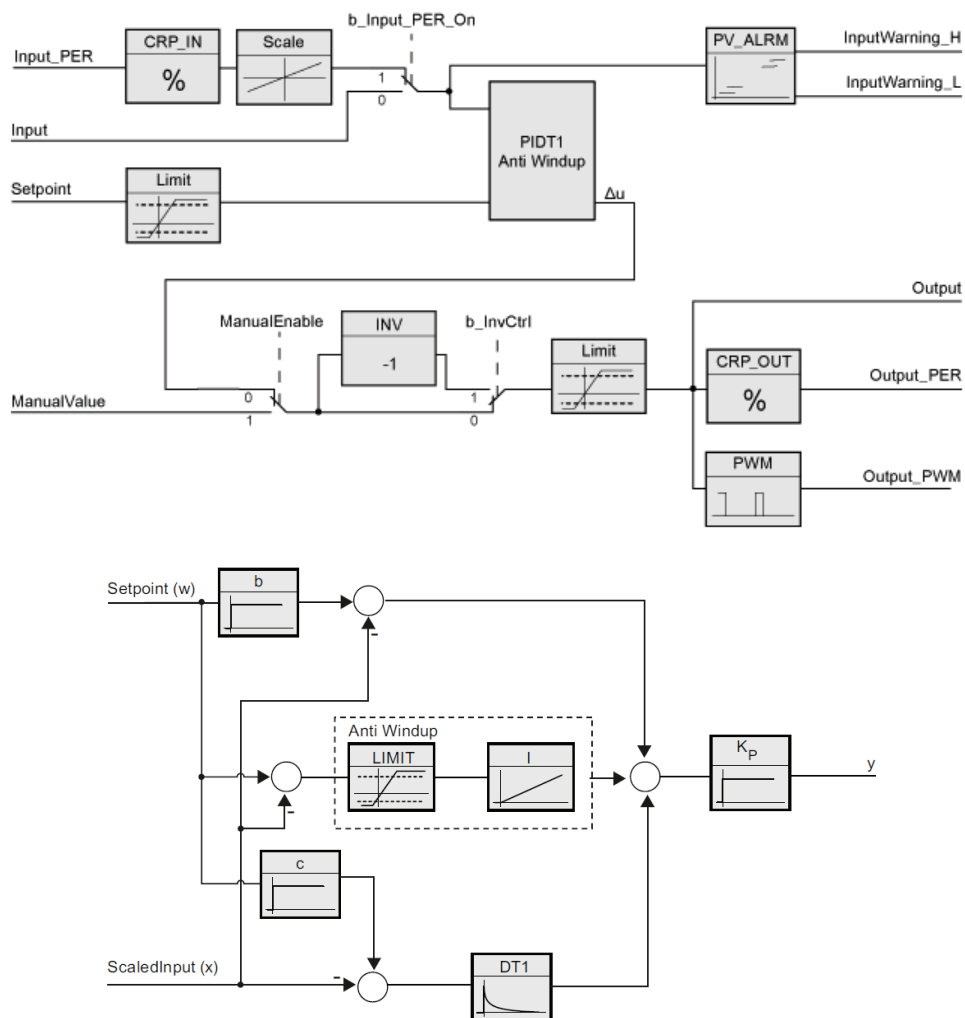


Figura 3.40. Diagramas de Bloque PID y AntiWindup del S7-1200 [40]

**ACCIÓN PROPORCIONAL P.-** La acción proporcional, incrementa el valor de salida en proporción a la desviación.

**ACCIÓN INTEGRAL I.-** La acción integral, incrementa el valor de salida hasta que la desviación haya sido balanceada.

**ACCIÓN DERIVATIVA D.-** La acción derivativa, incrementa con la velocidad de cambio de la desviación, corrige el valor del proceso tan rápido como sea posible.

*Tiempo de Acción Integral.-* Determina el tiempo de funcionamiento de la acción integral. Se desactiva la acción con un valor igual a 0,0.

*Tiempo de acción derivativa.-* Determina el tiempo de funcionamiento de la acción derivativa. Se desactiva la acción con un valor igual a 0,0.

*Coefficiente de retardo derivativo.-* Retarda el efecto de la acción derivativa.

Retardo derivativo = Tiempo de acción derivativa x Coeficiente de retardo derivativo.

- 0,0: La acción derivativa es efectiva solamente para un ciclo.
- 0,5: Este valor a demostrado ser útil en la práctica en sistemas de control con una constante de tiempo dominante.
- > 1,0: Cuanto mayor sea el coeficiente, mayor será el retraso de la acción derivativa.

*Ponderación de la acción Proporcional.-* La acción proporcional puede verse atenuada por cambios de set point. Se aplican valores entre 0,0 (Efectiva) y 1,0 (No efectiva). La acción proporcional es totalmente efectiva para cambios del valor del proceso.

*Ponderación de la acción Derivativa.-* La acción derivativa puede verse atenuada por cambios de set point. Se aplican valores entre 0,0 (Efectiva) y 1,0 (No efectiva). La acción derivativa es totalmente efectiva para cambios del valor del proceso.

*Tiempo de muestreo del algoritmo PID.-* El controlador necesita una cierta cantidad de tiempo para determinar el valor de salida, por esta razón no es aconsejable tomar el valor de salida en cada ciclo de programa; el tiempo de muestreo del

algoritmo PID representa el tiempo entre dos cálculos del valor de salida. Se redondea a un múltiplo del tiempo de muestreo del PID\_Compact, las demás funciones del PID\_Compact se ejecutan en cada ciclo.

De la respuesta en el tiempo de un sistema controlado a una señal paso, podemos determinar algunas características del sistema:

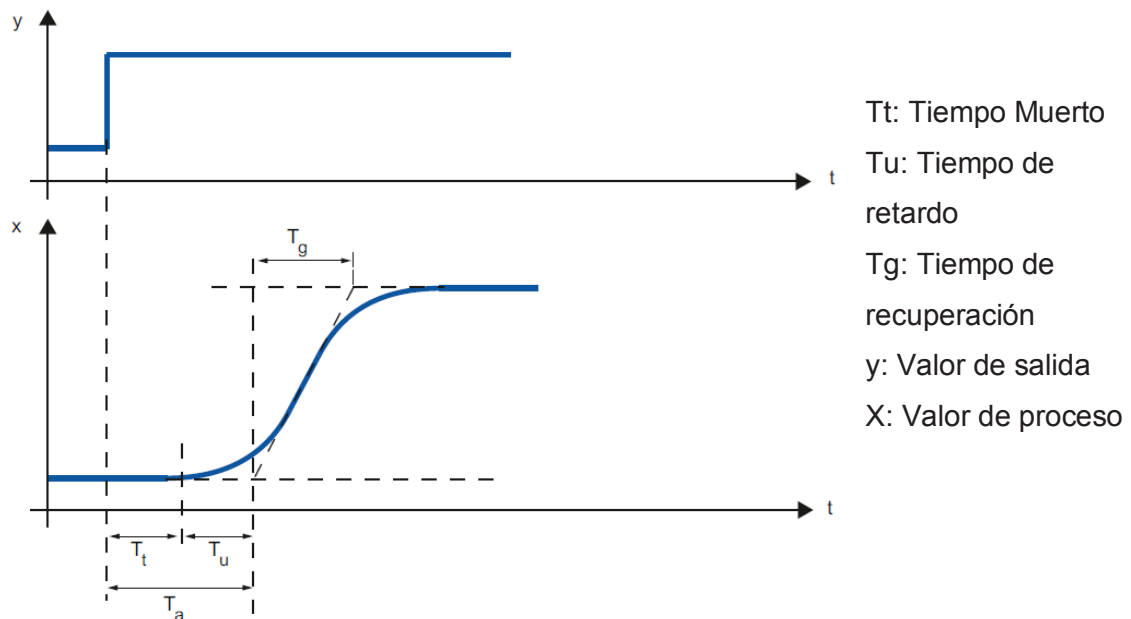


Figura 3.41. Características de la respuesta de un sistema a la entrada paso [40]

Según Siemens, la controlabilidad de un sistema puede ser estimada a partir de la relación:  $T_u/T_g$ .

Tabla 3.8. Estimación de la controlabilidad de un sistema según Siemens [40]

Tipo de proceso	$T_u / T_g$	Adaptación de control
I	< 0,1	Puede ser controlado
II	0,1 a 0,3	Puede todavía ser controlado
III	> 0,3	Dificultad para controlarlo

Además Siemens ofrece una tabla para determinar los valores de las constantes de un sistema de control:



Tabla 3.9. Cálculo de Valores de las constantes PID [34]

Tipo de control	Constantes
<b>P</b>	$GAIN \approx v_{max} \times Tu [^{\circ} C]$
<b>PI</b>	$GAIN \approx 1.2 \times v_{max} \times Tu [^{\circ} C]$
<b>PD</b>	$GAIN \approx 0.83 \times v_{max} \times Tu [^{\circ} C]$ $TD \approx 0.25 \times v_{max} \times Tu [min]$ $TM\_LAG \approx 0.5 \times TD [min]$
<b>PID</b>	$GAIN \approx 0.83 \times v_{max} \times Tu [^{\circ} C]$ $TI \approx 2 \times Tu [min]$ $TD \approx 0.4 \times Tu [min]$ $TM\_LAG \approx 0.5 \times TD [min]$
<b>PD/PID</b>	$GAIN \approx 0.4 \times v_{max} \times Tu [^{\circ} C]$ $TI \approx 2 \times Tu [min]$ $TD \approx 0.4 \times Tu [min]$ $TM\_LAG \approx 0.5 \times TD [min]$

### 3.7.1 BLOQUE PID COMPACT DEL S7-1200

La serie de PLC S7-1200 cuenta con la instrucción tecnológica "PID Compact", se utiliza en un bloque de interrupción cíclica de programa y nos permite implementar un control PID con optimización de constantes automático, para ello se tienen dos procedimientos:

### 3.7.2 OPTIMIZACIÓN INICIAL:

La optimización inicial determina la respuesta del proceso a un escalón de consigna y busca el punto de inflexión. A partir de la inclinación máxima y del tiempo muerto del sistema regulado se calculan los parámetros PID óptimos. Cuando más estable es el valor real, con mayor facilidad y precisión se pueden calcular los parámetros PID. Un ruido del valor real es aceptable siempre que la subida del valor real sea considerablemente mayor que el ruido.

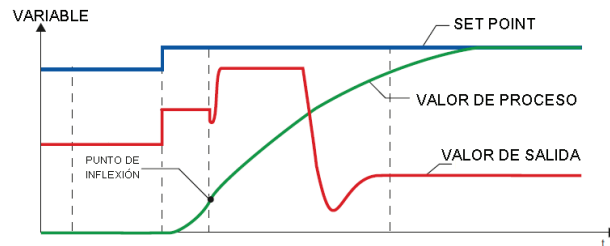


Figura 3.42. Proceso de Optimización Inicial. [40]

### 3.7.3 OPTIMIZACIÓN FINA:

La optimización fina genera una oscilación constante y limitada del valor real. Los parámetros PID se optimizan para el punto de operación a partir de la amplitud y la frecuencia. A partir de los resultados se vuelven a calcular todos los parámetros PID. Los parámetros PID existentes después de la optimización fina muestran en su mayoría un comportamiento de guía y ante fallos mucho mejor que los parámetros PID de la optimización inicial. PID\_Compact intenta generar automáticamente una oscilación que es mayor que el ruido del valor real. La estabilidad del valor real ejerce tan sólo una mínima influencia sobre la optimización fina.

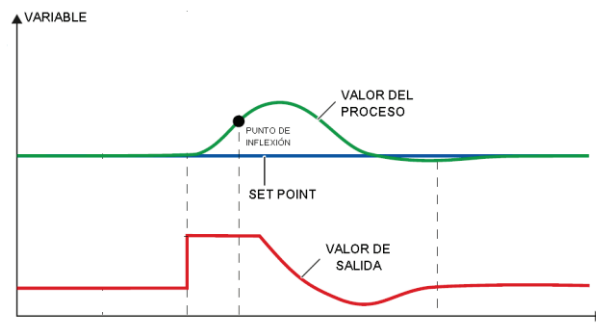


Figura 3.43. Proceso de Optimización Fina. [40]

El bloque PID del controlador sintoniza automáticamente el PID, tal como se indicó, en el Capítulo 5 se determina una función de transferencia equivalente que permite determinar teóricamente los parámetros PID. Las funciones de transferencia equivalentes para cada lazo de control son:

Función de transferencia equivalente, lazo de control de presión:

$$G(s) = \frac{e^{-174,437s}}{(809,165s + 1)(971s + 1)}$$

Función de transferencia equivalente, lazo de control de Emisiones de CO:

$$G(s) = \frac{2 e^{-1,5s}}{(0,6475s + 1)(2,24s + 1)}$$

## CAPÍTULO 4

### DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE HMI

El presente capítulo presenta una descripción del HMI utilizado, su entorno de programación a través del software TIA Portal V11 y la lógica de programación.

#### 4.1 HMI – HUMAN MACHINE INTERFACE

Un sistema HMI constituye la interfaz entre el usuario y el proceso. El desarrollo del proceso es controlado básicamente por el controlador. Por medio de un panel de operador, el usuario tiene la posibilidad de observar el proceso o de intervenir en él. [39]

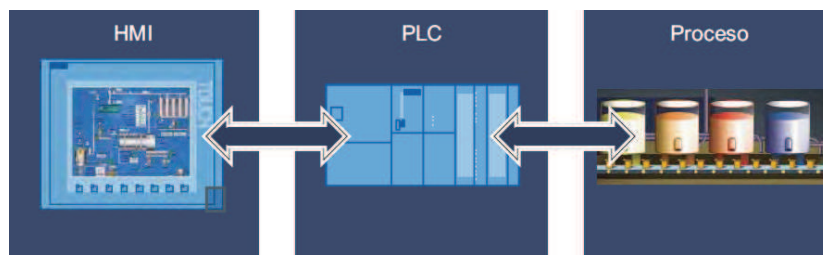


Figura 4.1. Esquema de organización de sistema [39]

Para manejar y observar máquinas e instalaciones existen las posibilidades siguientes:

- Visualizar procesos
- Manejar procesos
- Emitir avisos
- Administrar parámetros de proceso y recetas

Hoy en día, la mayoría de las máquinas ofrecen la visualización de forma estándar. Especialmente en las máquinas de menor tamaño y en las aplicaciones sencillas el factor costo juega un papel decisivo. Para las aplicaciones básicas, los paneles de operador con funciones básicas suelen considerarse completamente suficientes. El sistema utiliza un panel de la serie: KP300 BASIC MONO PN, en el

**ANEXO 5** se pueden observar las características técnicas del panel; a continuación se pueden observar sus partes:

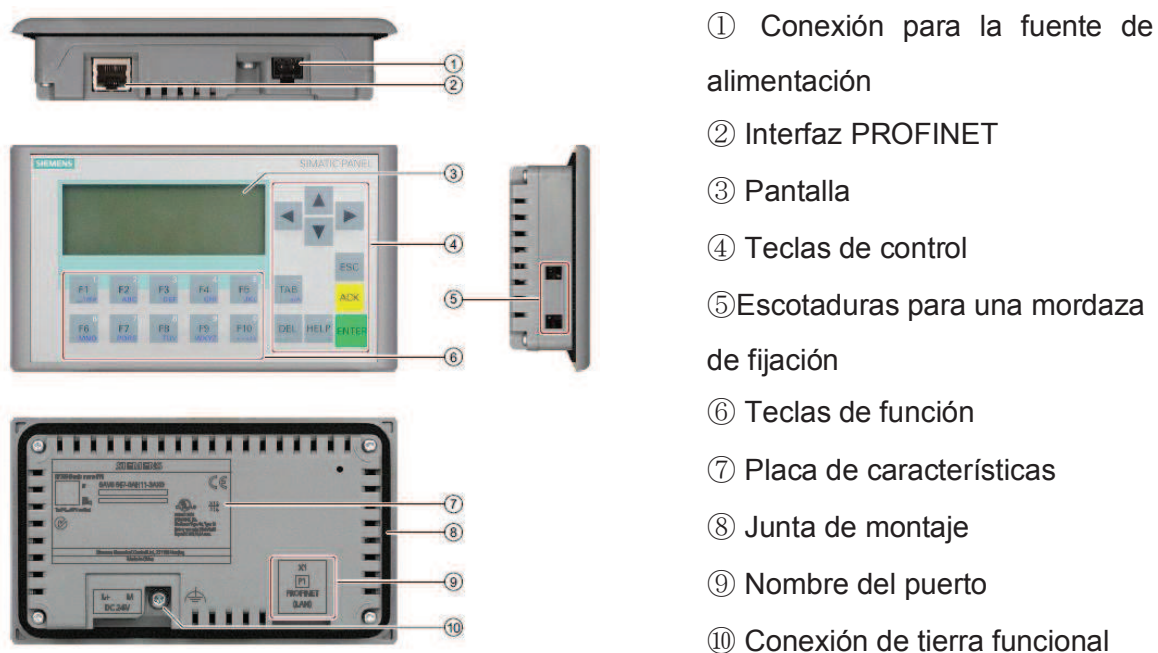


Figura 4.2. Partes Constitutivas Panel KP300 Basic de Siemens [41]

Para la programación del Panel, es necesario tener en cuenta la disponibilidad de cada una de las funciones propias del modelo KP300, la lista de prestaciones se ha tomado del sistema de información que incluye el software de programación WinCC, incluido en el TIA Portal V11 y detallan en la **Tabla 4.1**:

Tabla 4.1. Disponibilidad de Funciones Panel KP300 Basic de Siemens [42]

#### Variables

Número de variables del proyecto	250
Número de elementos por matriz	100

#### Comunicación

Número de conexiones	4
----------------------	---

#### Sistema de ayuda

Longitud de un texto de ayuda (en caracteres)	320
---	-----

#### Avisos

Número de categorías de avisos	32
Número de avisos de bit	200
Número de avisos analógicos	15
Longitud de un aviso (en caracteres)	80
Número de valores de proceso por aviso	8
Tamaño del búfer de avisos	256
Número de eventos de aviso pendientes	64

## Imágenes

Número de imágenes	50
Número de campos por imagen	30
Número de variables por imagen	30
Número de objetos complejos por imagen 1)	5
Número de elementos de matriz por imagen 2)	100
1) Son objetos complejos: barra, deslizador, librería de símbolos, reloj y todos los objetos del área de controles.	
2) Los elementos de matriz contenidos en recetas también cuentan.	

## Administración de usuarios

Número de grupos de usuarios	50
Número de autorizaciones	32
Número de usuarios	50

## Idiomas

Número de idiomas de runtime	5
------------------------------	---

## Recetas

Número de recetas	5
Número de elementos por receta1)	20
Número de registros por receta	20
Memoria reservada para los registros en la memoria flash interna	40 Kb
1) En caso de utilizar matrices, cada elemento de matriz cuenta como un elemento de receta.	

## Curvas

Número de curvas	25
------------------	----

## Listas de textos y gráficos

Número de listas de gráficos	100
Número de listas de textos	150
Número de entradas por lista de textos o gráficos	30
Número de objetos gráficos	500
Número de elementos de texto	500

## Proyecto

Tamaño del archivo de proyecto "*.srt"	512 kB
--	--------

## 4.2 ENTORNO DE PROGRAMACIÓN

Como se mencionó anteriormente el software de programación TIA Portal incorpora un componente, WinCC para la programación de paneles HMI, el mismo que está relacionado con el Step 7 útil para la programación del PLC; estos componente comparten una base de datos, parte del proyecto en el TIA Portal. Los cambios de datos de aplicación, como por ejemplo las variables, se actualizan en todo el proyecto automáticamente; abarcando incluso varios dispositivos. Además el software ofrece la facilidad de renombrar o redefinir variables desde cualquier punto del programa si dicha variable se la utiliza en

diferentes bloques de programa de distintos controladores y en diferentes imágenes HMI.

El TIA Portal ofrece la facilidad de interconectar varios dispositivos controladores y HMI en red bajo el estándar PROFINET, configuración de direcciones y subredes; el proceso básico de implementación del sistema se describe a continuación:

En primer lugar se crea un nuevo proyecto en TIA Portal (figura a) se muestra la página inicial de software en la parte izquierda encontramos las distintas tareas, en la parte central podemos escoger acciones y en la parte derecha se encuentra la ventana de selección; en la parte inferior izquierda encontramos la opción “vista del proyecto” que permite saltar a la página de programación. Para el caso la tarea es iniciar, la acción es crear nuevo proyecto; se selecciona el nombre del proyecto, la ubicación de almacenamiento, el autor y los comentarios que son opcionales. Una vez creado el proyecto, se debe escoger el controlador que se utiliza en: >> Dispositivos y Redes >> Agregar dispositivo (figura b), finalmente agregar y automáticamente se abre la ventana principal del proyecto.

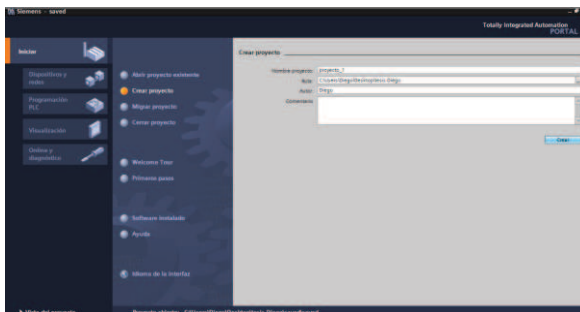


Figura a

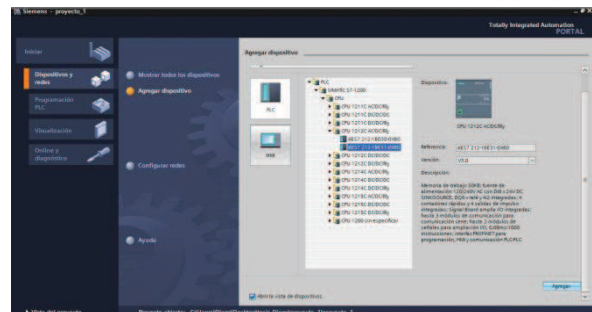


Figura b

Figura 4.3 Creación de Programa TIA Software V11

Una vez agregado el controlador se configura los distintos módulos que se utilizarán (figura c) en Catálogo de Hardware, se encuentran disponibles los módulos del PLC, basta encontrar la serie correcta y añadirlos al proyecto, para el caso se han añadido 2 módulos de señal analógica y un signal board. La ventana principal muestra el PLC con los módulos añadidos (figura d).

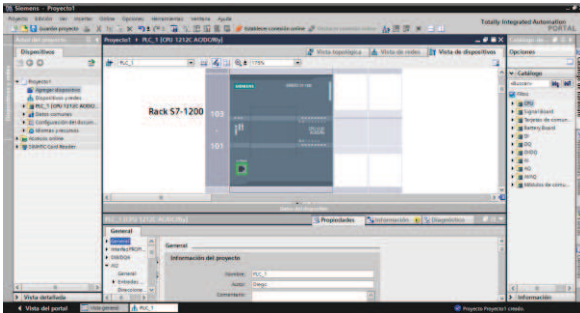


Figura c

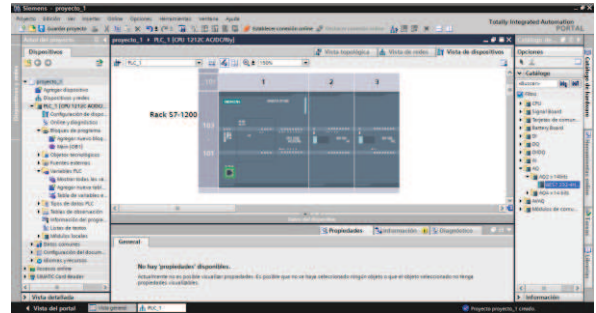


Figura d

Figura 4.4 Configuración de Dispositivos en TIA V11

Entonces se agrega el Panel al proyecto (figura e), en Árbol del proyecto se escoge la opción agregar dispositivo, entonces se despliega la pantalla con los dispositivos soportados por la versión del software (figura f).

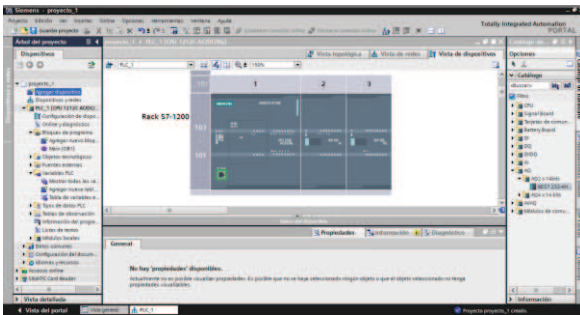


Figura e

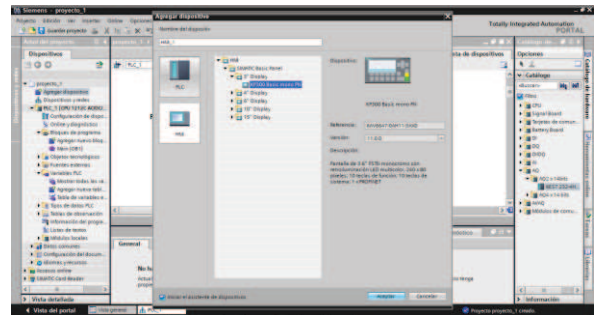


Figura f

Figura 4.5 Configuración Panel HMI en TIA V11

Se despliega el Asistente para inicialización, que permite configurar las condiciones básicas de funcionamiento; se elige el dispositivo al que se va a conectar (figura g), esta es la razón por la cual el controlador se crea previamente, entonces detectará automáticamente el controlador, la segunda configuración es el formato de imagen, corresponde a los datos que se mostrarán en el encabezado de todas las imágenes del sistema.

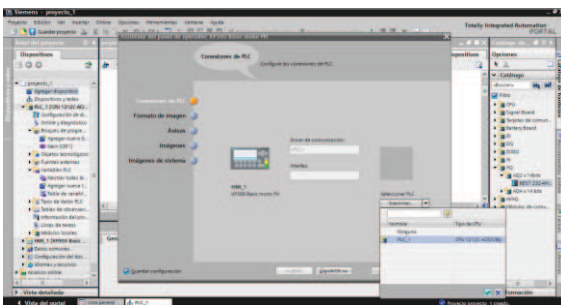


Figura g

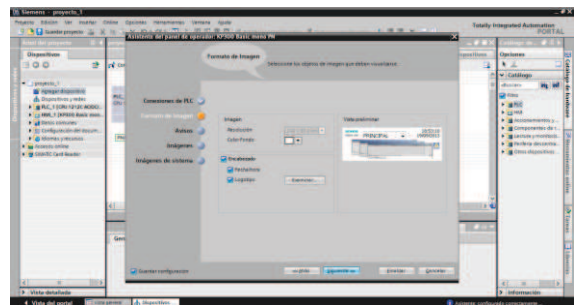


Figura h

Figura 4.6 Configuración HMI

La tercera configuración corresponde a los avisos que se desplegarán en la pantalla, estos avisos se configuran ante determinados eventos que se definirán ya sea como alarma o como fallo; además podemos configurar el comportamiento de dichos avisos con acuse o sin acuse manual, el desplazamiento de ellos se configura en esta ventana. La cuarta configuración consiste en ingresar un esquema central de acceso a las imágenes que se crearán en el HMI (Figura i), se debe tener en cuenta que la distribución ingresada es modificable en la programación de imágenes.

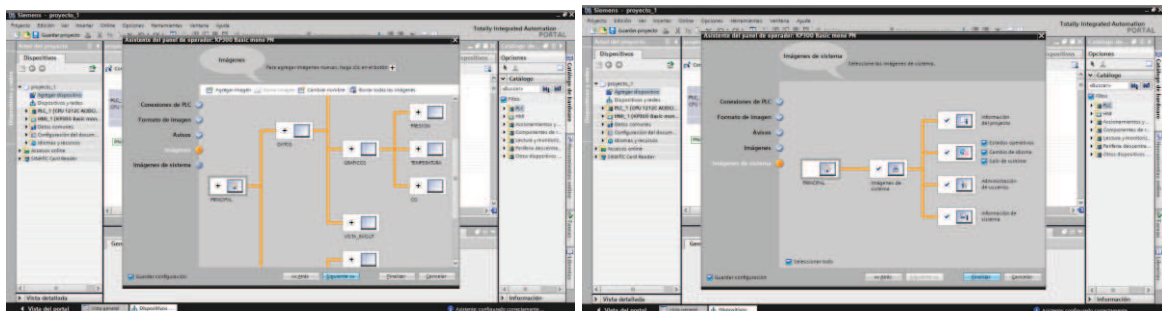


Figura i

Figura j

Figura 4.7 Configuración de Imágenes de HMI

Finalmente se configura las imágenes del sistema que se desea que se creen automáticamente; entre la cuales están: Información del proyecto, Estados Operativos, Cambio de Idioma, Salir de Runtime, Administración de Usuario, Información de Sistema (Figura j).

Después de finalizar el Administrador, en el Árbol del proyecto se selecciona la opción dispositivos y redes, en esta ventana se observa la conexión que se realizó en el administrador de panel, en el caso de no haberla creado podríamos establecer la conexión en esta ventana, escogemos conexiones seleccionamos la conexión y marcamos a la conexión como conexión HMI, con lo cual queda configurado el proyecto.



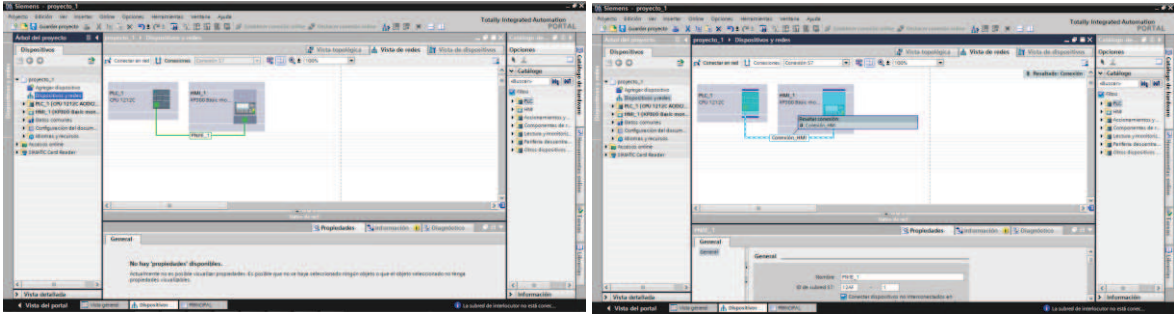


Figura k

Figura l

Figura 4.8 Configuración Red de Comunicación

### 4.3 ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN

En general, los paneles Básicos de Siemens se manejan en base a imágenes, en cada una de estas imágenes se puede agregar información para mostrar el estado de las variables, así como la interfaz para controlarlas; para ello, el software cuenta con herramientas de programación agrupados en: Objetos básicos de programación, permiten realizar figuras básicas (líneas, texto, etc.); Elementos, contienen elementos de maniobra y elementos de visualización; Controles, principalmente contiene visor de curvas y administración de usuarios; Gráficos, permite insertar un imagen cualquiera desde un archivo del computador, para ello la imagen debe convertirse a mapa de bits monocromático. Además se pueden añadir animaciones a los objetos que se insertan en la imagen, esto controlado por variables booleanas o analógicas.

La imagen muestra el entorno de programación del panel, en la parte izquierda encontramos el árbol del proyecto, entre otras funciones permite crear y organizar las imágenes del proyecto, administrar variables HMI, configurar conexiones de variables entre controlador y panel, configurar avisos HMI, configurar recetas, crear listas de textos y gráficos. En la parte izquierda encontramos las herramientas de programación, Animaciones, diseño, instrucciones; finalmente en la parte inferior se muestran las propiedades y configuración individual de cada elemento montado en la imagen.

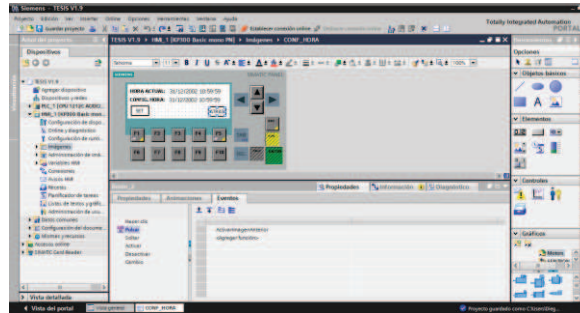


Figura 4.9. Pantalla de Programación TIA Portal V11 para HMI

#### 4.4 AVISOS HMI

Es muy importante que el sistema pueda detectar y desplegar de forma llamativa un mensaje de error o una alarma de precaución; para esto se configuran los avisos HMI, disponibles en el panel KP300 de Siemens, los avisos se pueden configurar por categorías, para el proyecto en curso se utilizan tres categorías:

**AVISOS DE ERRORES.-** Se activa ante situaciones críticas, y el caldero se desactiva hasta que el operario, verifique el sistema y acuse el aviso. En el grupo de errores encontramos: Exceso de presión en el caldero, compuerta del quemador abierta, paro de emergencia activado, nivel bajo-bajo de agua, acumulación de fallos excedido.

**AVISO DE SISTEMA.-** Se activa momentáneamente, para informar el estado del sistema, conexión o desconexión del panel con el controlador.

**AVISO DE ALARMAS.-** Se mantienen activas mientras se mantenga una condición de alarma, el caldero no se apaga pero se el panel muestra, la condición insegura.

Los avisos también se configuran de acuerdo a la variable monitoreada, así tenemos: avisos de bit, que son los avisos que se activan cuando un bit de una variable se activa y avisos analógicos que se activan cuando una variable excede un valor determinado.

En la siguiente figura se muestra la pantalla de configuración de avisos, en la parte superior encontramos el tipo de aviso analógico o binario, mientras que

individualmente se puede configurar el grupo al que pertenecen. Además en la parte inferior se pueden añadir eventos a cada aviso.

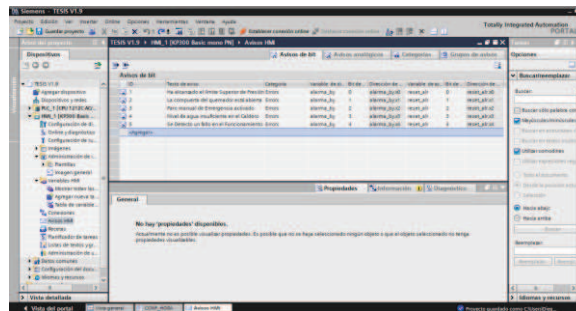


Figura 4.10. Pantalla de configuración de avisos

## 4.5 ADMINISTRACIÓN DE USUARIOS

En Administración de usuarios podemos controlar el grado de acceso que tiene un usuario, se pueden configurar dos grupos de usuarios:

**GRUPO DE ADMINISTRADORES.-** Tiene control sobre la administración de usuarios, programación, operación, monitorización del sistema.

**GRUPO DE USUARIOS.-** Tienen acceso únicamente a la operación y monitorización del sistema.

En la siguiente figura se muestra la pantalla de administración de usuarios:

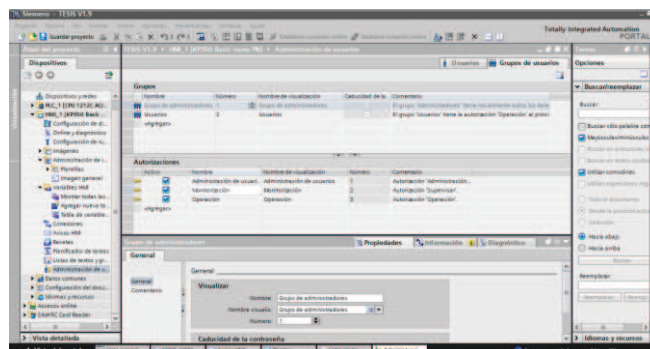


Figura 4.11. Pantalla de Configuración De Usuarios

## 4.6 ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN

En la **Figura 4.12** se muestra un esquema de organización de imágenes del Panel HMI, la pantalla inicial después de un reinicio del panel es la imagen raíz, muestra

una carátula inicial; desde ésta podemos acceder a la imagen principal en donde se presentan cuatro bloques de acceso al operador.

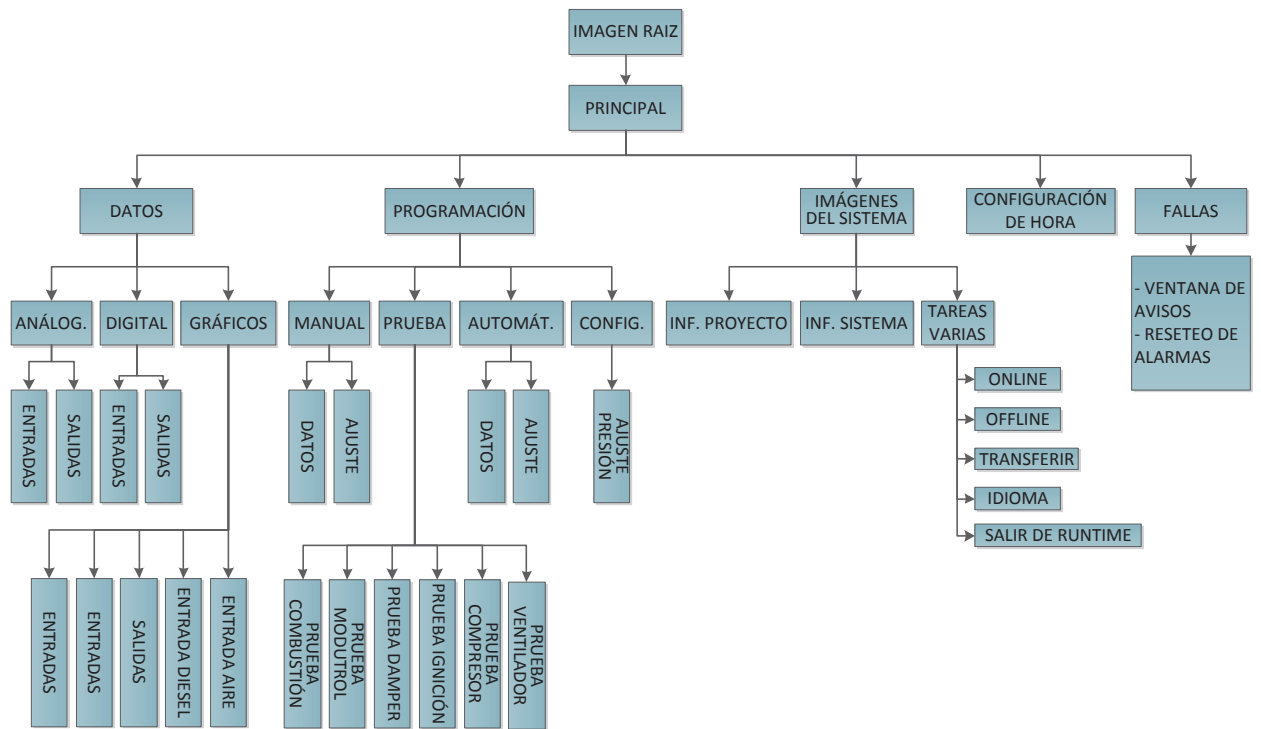


Figura 4.12. Diagrama de Organización Programa de Panel HMI

- Datos.- Este bloque contiene la información de todos los sensores, detectores y actuadores; ordenados según su tipo: analógicos, digitales, entradas, salidas; además se puede observar cada valor analógico en un visor de curvas de forma gráfica.
- Programación.- Este bloque permite configurar el modo de funcionamiento del caldero, el caldero tiene tres tipos de control de combustión: dos modos de funcionamiento automático, y uno manual; además se puede poner el caldero en modo de prueba para la verificación del funcionamiento individual de cada actuador.
- Imágenes del Sistema.- Accede a Información del proyecto y sistema, además contiene opciones propias del sistema del panel; esto es permite conectarse/desconectarse del controlador, transferir actualización en variables, cambiar de idioma, únicamente texto propio del panel.
- Configuración de Hora.- Permite configurar la hora del sistema.
- Fallas.- Accede a la lista de avisos y mensajes de error, además se puede resetear manualmente algún aviso no acusado o restablecer el sistema.

## CAPÍTULO 5

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo presenta el resultado de las pruebas realizadas al nuevo sistema implementado en el caldero N°03 del IESS Hospital de Ambato, se presentan los resultados finales después de haber realizado sus correspondientes calibraciones.

#### 5.1 PRUEBA DE SENSORES Y DETECTORES

##### 5.1.1 CONTROL DE NIVEL

La primera prueba realizada fue la prueba del control de nivel, se debe asegurar que el nivel de agua contenido permanezca en un intervalo seguro durante todo el funcionamiento del caldero, en esta prueba se obtuvieron los siguientes resultados:

Nivel mínimo<sup>i</sup>= 15 mm (Encendido de la Bomba)

Nivel máximo<sup>i</sup>= 30 mm (Apagado de la Bomba)

Tiempo que permanece encendida la bomba<sup>ii</sup>: 1.34 minutos

Tiempo que permanece apagada la bomba<sup>ii</sup>: 1.34 minutos

En la prueba de nivel, si el agua cae hasta el nivel de corte establecido, el caldero se apaga y muestra la señal de alarma hasta que se normalice el nivel de agua dentro del caldero; tal y como se establece en la programación; se hizo necesario introducir un retardo en la respuesta cuando se alcanza el nivel de corte; al considerar las purgas manuales que realiza el operador, se determinó por pruebas el tiempo que le toma al agua cubrir el volumen expulsado y es menor a 10 segundos.

---

<sup>i</sup> Las medidas de nivel están referidas al nivel de corte indicado en el McDonell.

<sup>ii</sup> Los tiempos corresponden a un promedio tomado de entre 8 lecturas, a condiciones estables.

### 5.1.2 LIMITES DE SEGURIDAD

Entre éstos se ha considerado: El detector de presión de aire para la atomización de combustible, la entrada de alta presión, el final de carrera instalado para verificar el cierre de la compuerta del quemador y el pulsador paro de emergencia.

Se ha verificado el funcionamiento de cada uno de ellos en los distintos modos de funcionamiento; cumplen las condiciones de seguridad, esto es que para el primer caso se ordene el apagado normal del caldero hasta alcanzar una condición segura y para los demás casos se apague instantáneamente y desactive todas sus salidas.

El detector de alta presión se ha ajustado a una presión límite de 120 PSI, establecido como segunda seguridad en caso de falla en la lectura del transmisor de presión.

Adicional a los detectores mencionados, se realizó la prueba de un detector de flujo de aire para combustión, el cual presento un tiempo de respuesta aproximado de 1 segundo desde que se activa el ventilador de aire.

### 5.1.3 GESTIÓN SISTEMA GENERADOR DE VAPOR

Como se mencionó en los capítulos anteriores, el sistema de producción de vapor del IESS Hospital de Ambato está compuesto por 3 calderos, el control de funcionamiento se realiza desde un tablero general, en este tablero se programan los horarios de funcionamiento y también gestiona el relevo de funcionamiento de un caldero que presenta fallos por uno que funcione correctamente; para esto a nuestro sistema de control llegan 4 líneas: dos de ellas nos ayudan a la desactivación del caldero desde el tablero general cuando la salida de alarma por fallo se activa, y las otras dos habilitan el funcionamiento del caldero según los horarios programados; el caldero posee un selector de funcionamiento de tres posiciones:

**Apagado.-** El caldero no se activará hasta que el operario lo active.

**Funcionamiento manual.-** El Operador lo activa manualmente, el caldero entra en funcionamiento normal hasta que el operador lo deshabilite, considerando que le

funcionamiento normal del caldero consiste en encenderlo en una presión mínima y apagarlo en una presión máxima.

**Funcionamiento Automático.-** El caldero entra en funcionamiento normal durante los periodos de tiempo programados en el tablero general de control.

Tras la prueba se observó el cumplimiento de las condiciones de funcionamiento.

#### 5.1.4 SENSORES

**SENSOR DE LLAMA.-** Se realizaron pruebas produciendo una llama piloto (únicamente con GLP) y una llama principal (únicamente Diesel).

En la llama piloto se observó un voltaje de 6.35V, mientras que en la llama principal, el voltaje alcanza un valor de 9.25 V.

Adicionalmente se realizaron pruebas de respuesta ante una pérdida de llama en la cual, se observó que el amplificador de llama retiene el valor durante 3.35 segundos luego de cortarse la llama; instante en el cual baja el valor de voltaje hasta cero. Esta característica es propia del amplificador de llama y esta especificada en el dato de tiempo de respuesta ante un fallo del amplificador de llama, para el caso del amplificador está comprendida entre 2-4 segundos, según su manual de operación.

#### 5.1.5 SENSOR DE PRESIÓN

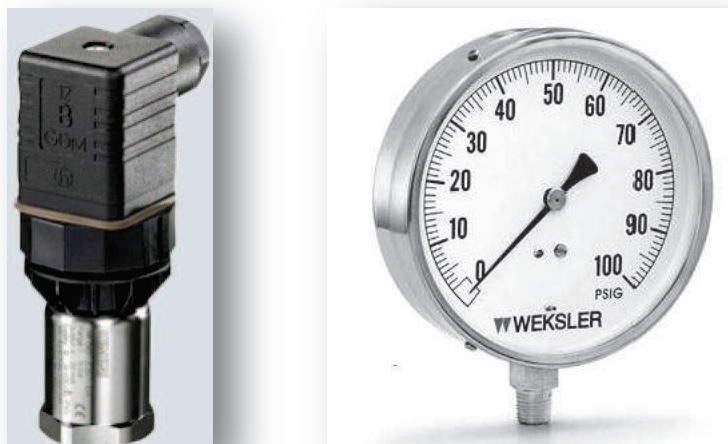


Figura 5.1. Medidores de Presión de Vapor

Las medidas de presión observadas, entre el manómetro instalado en el caldero y el sensor de presión SITRANS se presentan a continuación:

Tabla 5.1. Medidas de Presión Reales Obtenidas

<b>NUMERO LECTURA</b>	<b>SENSOR SITRANS (PSI)</b>	<b>NUMERO LECTURA</b>	<b>MEDIDA MANÓMETRO (PSI)</b>	<b>DIFERENCIA(PSI)</b>
1	-7	1	0	7
2	-3	2	5	8
3	0	3	10	10
4	6	4	15	9
5	11	5	20	9
6	13	6	22,5	9,5
7	16	7	25	9
8	22	8	30	8
9	28	9	35	7
10	29	10	38	9
11	34	11	40	6
12	41	12	45	4
13	43	13	49	6
14	47	14	50	3
15	48	15	52,5	4,5
16	53	16	55	2
17	59	17	60	1
18	65	18	64	1
19	64	19	65	1
20	70	20	70	0
21	75	21	75	0
22	81	22	80	1
23	90	23	88	2
24	92	24	90	2
25	95	25	92,5	2,5
26	97	26	95	2
27	103	27	100	3
28	108	28	105	3
29	114,5	29	110	4,5
30	119,5	30	115	4,5
31	125	31	120	5

En la **Figura 5.2**, se observa el comportamiento de cada uno de los medidores de presión instalados, en el rango de trabajo del caldero.



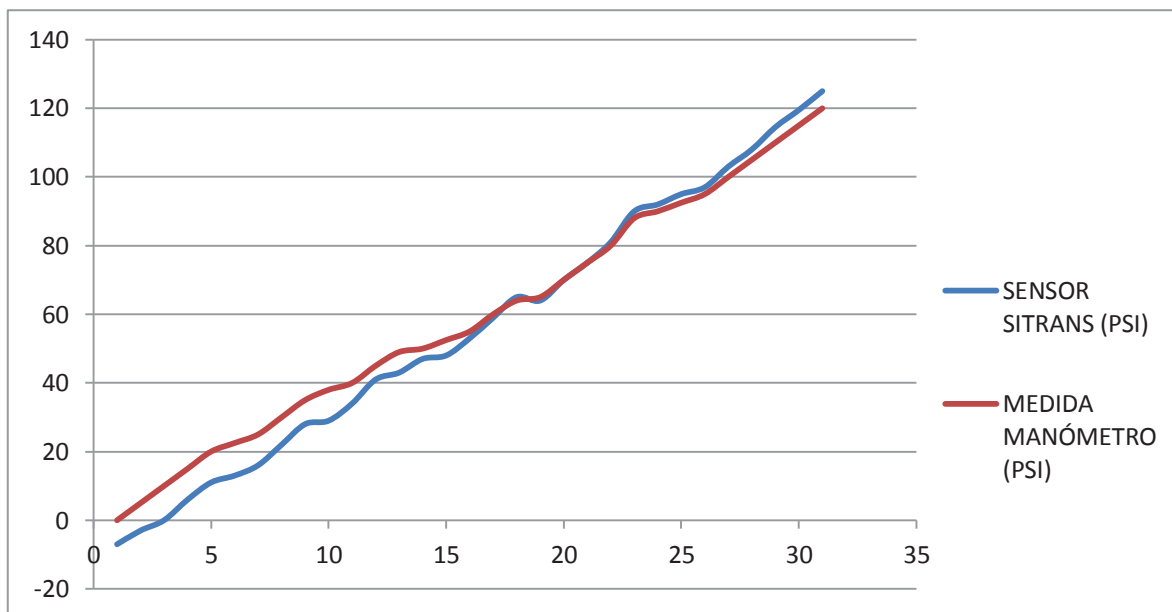


Figura 5.2. Medición de Presión SITRANS y Manómetro

A partir de los datos obtenidos encontramos la diferencia existente entre las lecturas del sensor SITRANS y el manómetro instalado, cabe notar que el sensor SITRANS es más preciso que el manómetro.

### 5.1.6 SENSOR DE TEMPERATURA

Debido a la dificultad de bajar totalmente la temperatura en el interior del caldero, las mediciones se realizaron en un rango reducido, rango en el cual se obtuvieron los siguientes resultados:

LECTURA SIN COMPENSACIÓN		LECTURA CON COMPENSACIÓN	
TERMOPAR	PIRÓMETRO	TERMOPAR	PIRÓMETRO
55	35	34,5	35
101	75	80,3	75
105	79	84,1	79
108	82	88	82
120	105	90	105

Tabla 5.2. Lectura de temperatura antes y después de una compensación

### 5.1.7 SENSOR DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El sensor de monóxido de carbono se implementa en su conexión simple, pues, mediante pruebas se determinó que no existe diferencia significativa entre las

lecturas tomadas en cada una de sus conexiones. La Figura 5.3 muestra la respuesta del sensor de CO a lazo abierto.

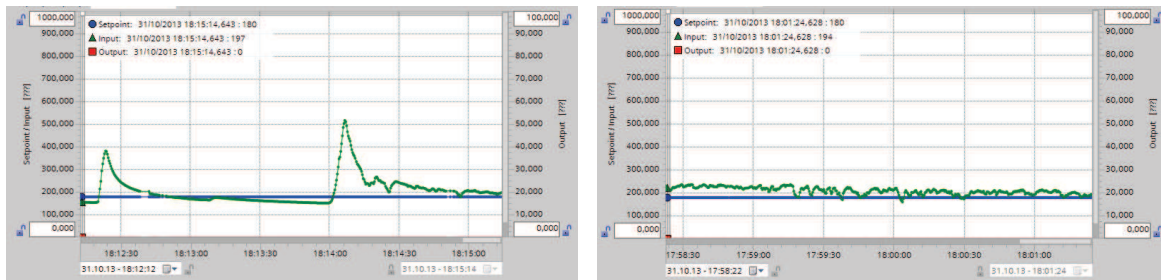


Figura 5.3 Respuesta del sensor de Monóxido de Carbono

## 5.2 PRUEBA DE SALIDAS DIGITALES:

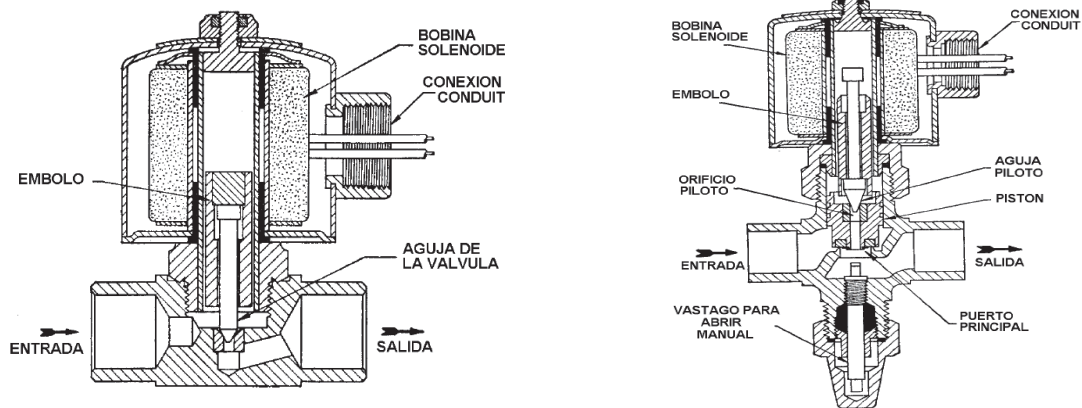
### 5.2.1 FUENTE DE IGNICIÓN

La fuente de ignición, se activa 6 segundos durante el arranque.

### 5.2.2 ELECTROVÁLVULAS

Se tienen dos electroválvulas: una de gas y una de diesel, de características eléctricas similares, la primera se activa 8 segundos durante el arranque y la otra en forma continua durante el funcionamiento del caldero.

Aunque tienen características eléctricas similares, el tipo de electroválvula es diferente la Electroválvula de diesel es de acción directa, y la de gas es una electroválvula operada por piloto; la diferencia es que la primera sirve para manejar bajas capacidades y presentan un MOPD (Diferencial Máximo de Presión de Apertura), pues para la operación de esta válvula depende únicamente de la potencia del solenoide; la segunda en cambio, se utiliza para grandes capacidades utiliza una combinación de la bobina solenoide y la presión de línea, en este tipo de electroválvulas en cambio, necesitan cumplir con un MinOPD (Diferencial Mínimo de Presión de Apertura), requerido para levantar el pistón o diafragma del puerto principal.



Válvula de solenoide típica de acción directa, normalmente cerrada de dos vías.

Válvula de solenoide operada por piloto, normalmente cerrada, de dos vías con pistón flotante.

Figura 5.4. Válvulas Solenoides [43]

### 5.2.3 SALIDA DE ALARMA

La salida de alarma está formada por una luz indicadora de falla y un relé que activa la señal de alarma hacia el tablero general de control de los calderos. Se han realizado simulaciones de distintas situaciones de fallo, la respuesta del controlador cumple las condiciones de funcionamiento.

### 5.2.4 MOTOR VENTILADOR

Principalmente se han realizado pruebas para evitar que se inicie una secuencia de encendido sin que haya flujo de aire provisto por el motor del ventilador; pues sería causa de una inminente contra explosión; así también se realizaron pruebas de purga de aire anterior y posterior a la combustión.

### 5.2.5 MOTOR DEL COMPRESOR

Este motor funciona de forma paralela al ventilador, también se activa durante las purgas; es necesario que circule aire a través del inyector de diesel para evitar la acumulación de residuos de combustible.

## 5.3 SALIDAS ANALÓGICAS

### 5.3.1 CONTROL MODUTROL

Como se describió en el diseño del sistema de control, el modutrol se maneja a través de un potenciómetro digital, debido a la disponibilidad, se adquirió un potenciómetro de 50 K $\Omega$ ; no se tiene acceso a documentación sobre los elementos eléctricos internos que posee un modutrol; por experimentación se llegó a determinar que si la resistencia del potenciómetro que se conecta en los terminales A-W o B-W es mayor a 1 K $\Omega$ , el voltaje en los terminales supera los 5V y el potenciómetro digital tiene como valor máximo de funcionamiento 5,5V entre sus terminales; por esta razón se colocó en paralelo una resistencia de 330 $\Omega$  a cada uno de los terminales del potenciómetro con el fin de disminuir su resistencia equivalente. El desplazamiento del modutrol se calibro también de forma experimental, variando el voltaje y verificando el posicionamiento del motor. Según el manual del caldero **ANEXO 6**, la capacidad mecánica de variación de flujo de diesel es de 10,7 GPH a 37,1 GPH, a una presión de 10 PSI; las variaciones de desplazamiento no son estrictamente lineales, pero para el análisis se hará una aproximación y se considerará que es lineal en el rango controlado. Los valores de resistencia de control de movimiento del modutrol se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Respuesta de Modutrol ante el sistema de control

POSICIÓN	RWA( $\Omega$ )	RWB( $\Omega$ )	REQWA( $\Omega$ )	REQWB( $\Omega$ )	CAUDAL GPH
0	0,00	50000,00	0,00	327,84	10,7
1	196,08	49803,92	123,00	327,83	12,9
2	392,16	49607,84	179,20	327,82	15,1
3	588,24	49411,76	211,40	327,81	17,3
4	784,31	49215,69	232,27	327,80	19,5
5	980,39	49019,61	246,90	327,79	21,7
6	1176,47	48823,53	257,71	327,78	23,9
7	1372,55	48627,45	266,04	327,78	26,1
8	1568,63	48431,37	272,64	327,77	28,3
9	1764,71	48235,29	278,01	327,76	30,5
10	1960,78	48039,22	282,46	327,75	32,7
11	2156,86	47843,14	286,21	327,74	34,9
12	2352,94	47647,06	289,41	327,73	37,1

La **Figura 5.5** siguiente muestra la disposición física y el acoplamiento entre el modutrol y el dosificador de diesel para la combustión:

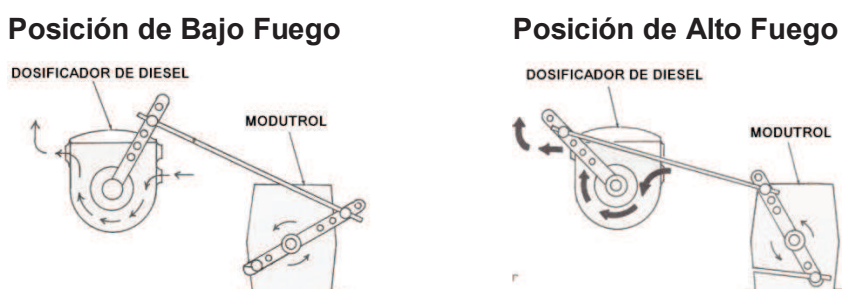


Figura 5.5. Disposición Física Modutrol

### 5.3.2 CONTROL DAMPER

A continuación se presenta los resultados obtenidos y curvas que describen el comportamiento del damper:

Tabla 5.4. Voltajes de control de Damper medidos

POSICIÓN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
VOLTAJE(V)	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4	4,4	4,8	5,2

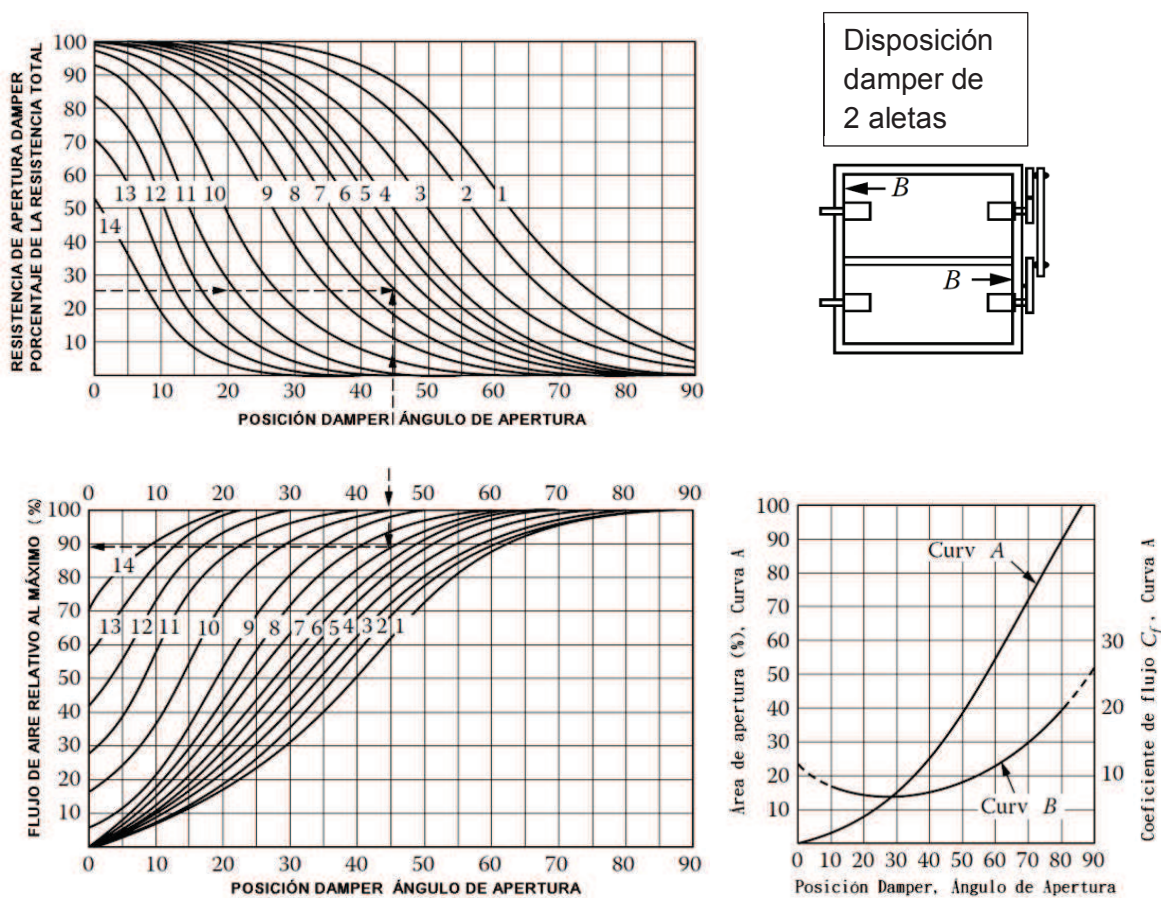


Figura 5.6. Características generales de un Damper de dos aletas

## 5.4 MEDIDOR DE TEMPERATURA DE GASES:

El caldero cuenta con un termómetro bimetálico, muestra la temperatura de salida de gases en la chimenea, según las especificaciones del manual del caldero la temperatura mínima de expulsión de gases es 365°F o 185 °C y la temperatura máxima es de 420 °F o 216 °C; normalmente en condiciones de funcionamiento continuo se tiene una temperatura de 200 °C.



Figura 5.7. Medidor de Temperatura de Gases de Chimenea Bimetálico [44]

## 5.5 DETERMINACIÓN MODELO EQUIVALENTE

### 5.5.1 MODELO LAZO DE CONTROL DE PRESIÓN

El modelo se obtiene a partir de la respuesta real en lazo abierto del sistema bajo ciertas condiciones ambientales determinadas por el INAMHI [45], Temperatura Media 15,8°C y Humedad Relativa aproximada 76%. Inicialmente, el caldero presenta una temperatura interna de 53°C, tubos de intercambio térmico limpios, temperatura media de alimentación de agua 24°C.

La siguiente figura muestra el comportamiento del caldero a potencia nominal desde un paro total, incluye un ciclo de funcionamiento después de haber alcanzado la presión de apagado.

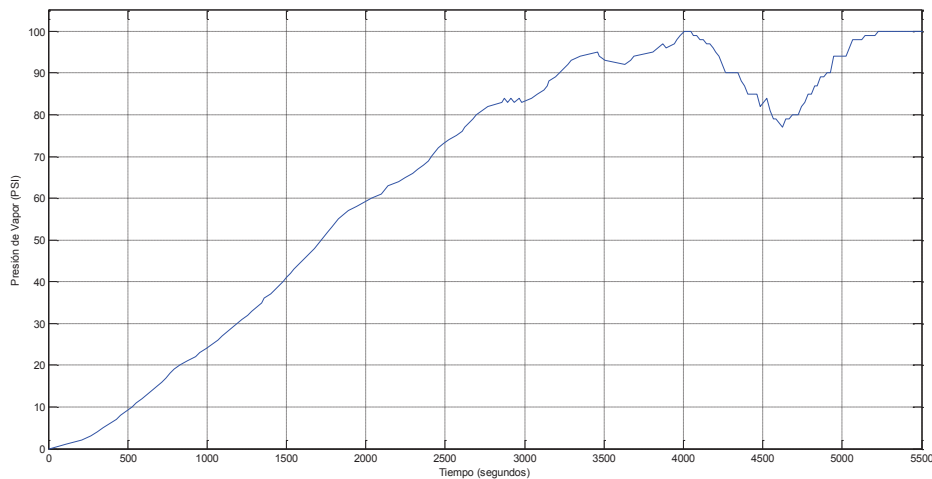


Figura 5.8 Respuesta real del sistema de Presión a Lazo abierto

Por la complejidad que presenta la modelación del sistema a partir de principios fundamentales, se recurre al planteamiento de un modelo empírico basado en la identificación real del proceso. Se determinan tres modelos mediante la respuesta a una entrada paso, utilizando las ecuaciones del método de identificación de tres puntos [46], el procedimiento utiliza los tiempos en que la curva de reacción alcanza el 25%, 50% y 75% del valor nominal de salida.

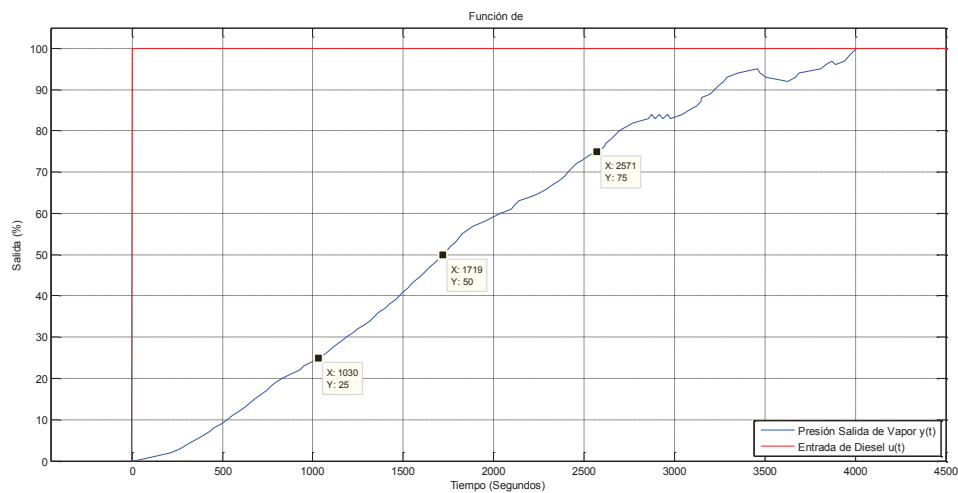


Figura 5.9 Tiempos de crecimiento de curva de reacción lazo de control de Presión

De la gráfica se tiene:

$$t_{25} = 1030 \text{ seg.}$$

$$t_{50} = 1719 \text{ seg.}$$

$$t_{75} = 2571 \text{ seg.}$$

### Modelo de Primer Orden mas Tiempo Muerto (POMTM)

$$P(s) = \frac{Kp e^{-Ls}}{Ts + 1}$$

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{100\% - 0\%}{100\% - 0\%} = 1$$

$$T = 0,9102 (t_{75} - t_{25}) = 0,9102 (2571 \text{ seg} - 1030 \text{ seg}) \rightarrow T = 1402,02 \text{ seg}$$

$$L = 1,2620 t_{25} - 0,2620 t_{75} = (1,2620 \times 1030 \text{ seg}) - (0,2620 \times 2571 \text{ seg})$$

$$L = 626,258 \text{ seg}$$

$$P(s1) = \frac{e^{-626,258s}}{1402,02 s + 1}$$

### Modelo de Polo Doble mas Tiempo Muerto (PDMTM)

$$P(s2) = \frac{Kp e^{-L's}}{(T's + 1)^2}$$

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{100\% - 0\%}{100\% - 0\%} = 1$$

$$T' = 0,5776 (t_{75} - t_{25}) = 0,5776 (2571 \text{ seg} - 1030 \text{ seg}) \rightarrow T' = 890,082 \text{ seg}$$

$$L' = 1,5552 t_{25} - 0,5552 t_{75} = (1,5552 \times 1030 \text{ seg}) - (0,5552 \times 2571 \text{ seg})$$

$$L' = 174,437 \text{ seg}$$

$$P(s2) = \frac{e^{-174,437s}}{(890,082 s + 1)^2}$$

### Modelo de Segundo Orden mas Tiempo Muerto (SOMTM)

$$P(s3) = \frac{Kp e^{-L''s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

$$L'' = L' = 174,437$$

$$a = \frac{t_{50} - L' - 1,4362T'}{1,9844 T' - t_{50} + L'} = \frac{1719 - 174,437 - 1,4362 \times 890,082}{1,9844 \times 890,082 - 1719 + 174,437} \rightarrow a = 1,2$$

$$T'' = \frac{2 T'}{1 + a} = \frac{2 \times 890,082}{1 + 1,2} \rightarrow T'' = 809,165$$

$$T_1 = T'' = 809,165 ; T_2 = aT'' = 1,2 \times 809,165 \rightarrow T_2 = 971$$

$$P(s3) = \frac{e^{-174,437s}}{(809,165 s + 1)(971 s + 1)}$$

Respuesta a una entrada paso unitario de la planta real y sus funciones de transferencia equivalentes:



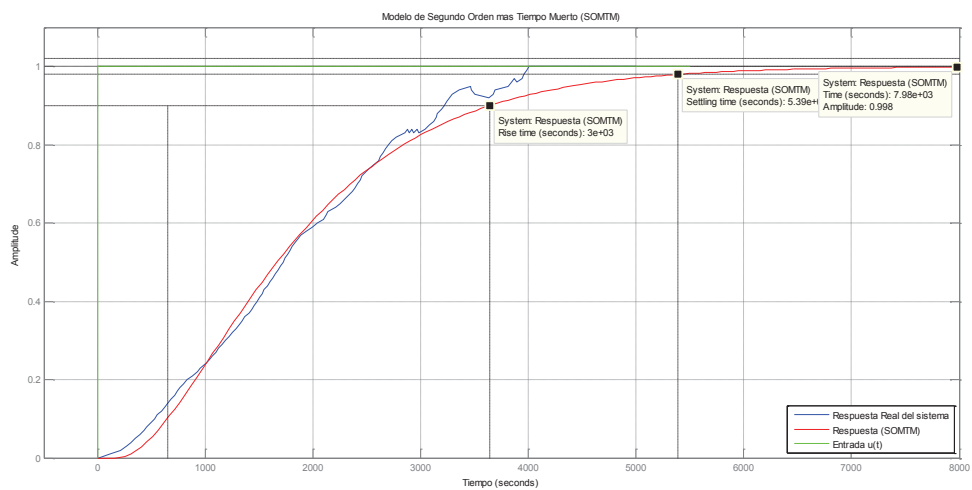
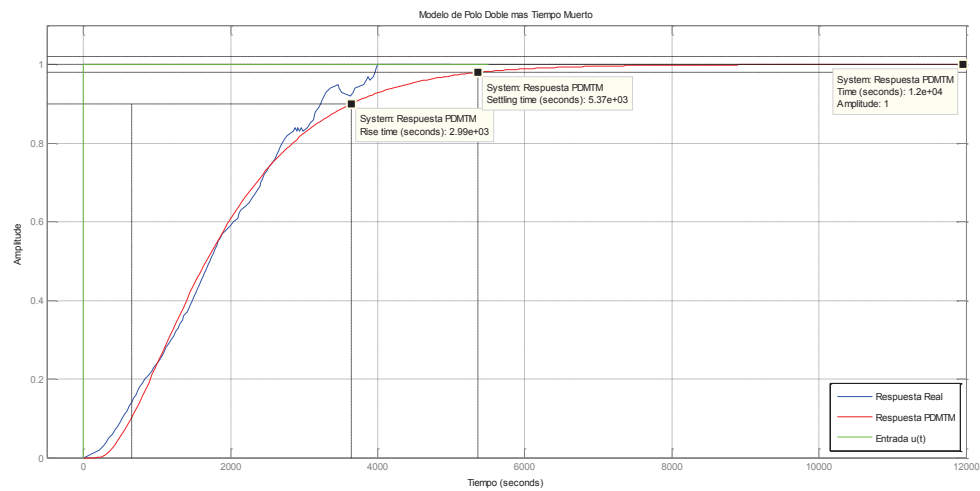
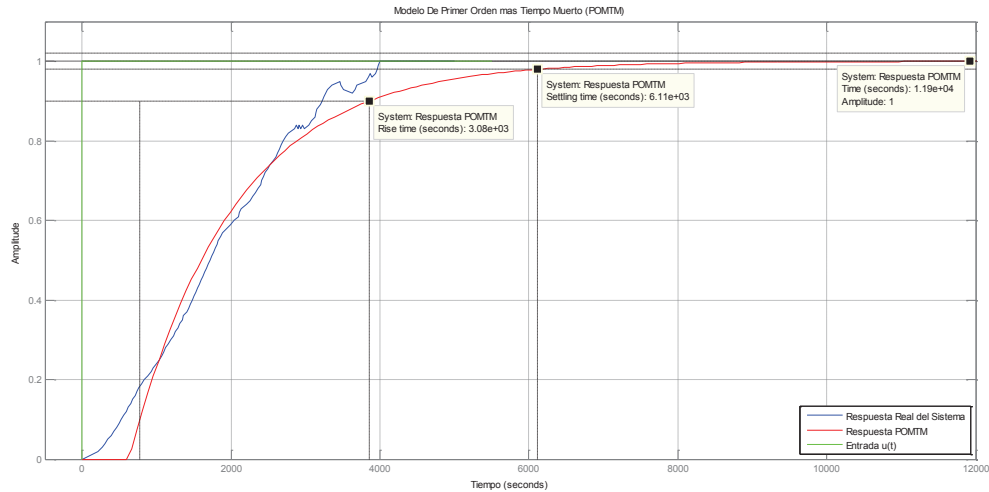


Figura 5.10 Respuesta de Modelos sistema de Control de Presión determinados

De donde encontramos que el Modelo de Segundo Orden ofrece la mejor aproximación.

### 5.5.2 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADOR PID DE PRESIÓN

El control PID se ajusta a partir del método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols, el sistema se caracteriza a partir de dos parámetros: L y T, obtenidos a partir de la respuesta a lazo abierto a una entrada paso. La función de transferencia equivalente considerada es:

$$G(s) = \frac{e^{-174,437s}}{(809,165s + 1)(971s + 1)}$$

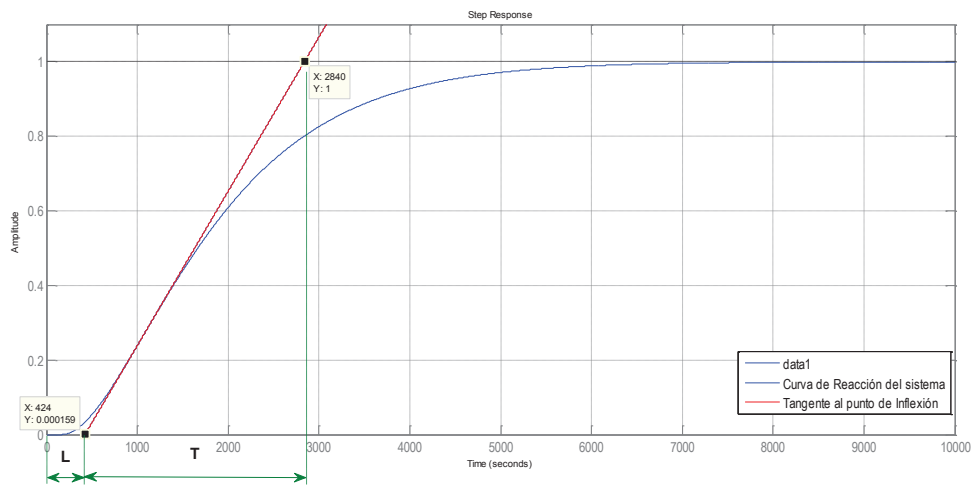


Figura 5.11 Sintonización de constantes PID de Presión

De la figura se obtiene:

$$L = 423,6158 \quad \text{y} \quad T = 2415,6$$

Los parámetros PID según el método son:

$$Kp = 1,2 \times \frac{T}{L} = 1,2 \times \frac{2415,6}{423,6158} \rightarrow Kp = 6,8428$$

$$ki = \frac{1}{2L} = \frac{1}{2 \times 423,6158} \rightarrow Ki = 0,00118 ; Ti = 847,232 \text{ seg}$$

$$kd = 0,5 L = 0,5 \times 423,6158 \rightarrow kd = 211,808 ; Td = 211,808 \text{ seg}$$

Comparación entre parámetros calculados y parámetros reales:

Tabla 5.5 Desviación entre constantes reales y teóricas de PID de presión

Parámetro	Estudio	S. Real	Desviación <sup>i</sup>
Kp	6,8428	3,4731	49,2 %
Ti	847,232	1089,064	22,2 %
Td	211,808	190,586	11,1 %

La diferencia se debe a los errores introducidos en la aproximación del modelo, además en el ajuste real se consideró un controlador que proporcione una respuesta más lenta que la teórica. A continuación se muestra los resultados obtenidos en la simulación (Línea azul autoajuste PLC):

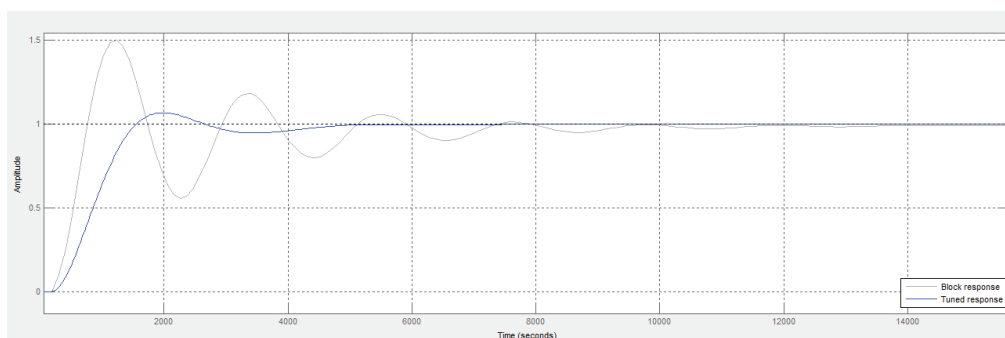


Figura 5.12 Comparación de respuesta sintonización real y teórica

### 5.5.3 MODELO LAZO DE CONTROL MONÓXIDO DE CARBONO

Las emisiones de Monóxido de Carbono producidas por una disminución de flujo en la entrada de aire de combustión se presentan en la figura, el análisis se realizó con flujo de combustible constante:

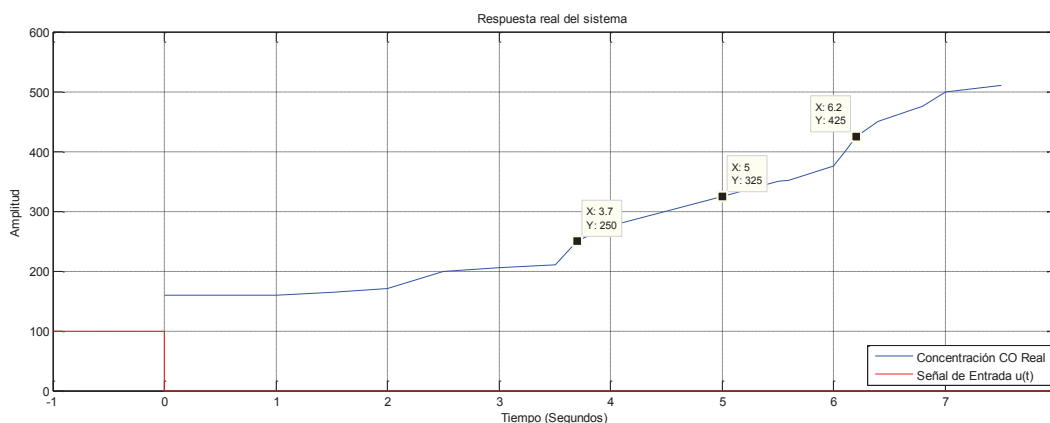


Figura 5.13 Tiempos de crecimiento de curva de reacción lazo de control de CO

<sup>i</sup> La desviación toma como referencia el valor mayor.

Al igual que el caso anterior recurrimos a un modelo equivalente, con ciertas observaciones: la concentración de CO detectada por el sensor en ningún momento llega a cero pues mide las concentraciones en el ambiente, no se pueden realizar altas variaciones se debe tener presente un flujo máximo y mínimo de aire dentro de los cuales se mantiene la combustión.

De la gráfica se tiene:

$$t_{25} = 3,7 \text{ seg.} \quad t_{50} = 5 \text{ seg.} \quad t_{75} = 6,2 \text{ seg.}$$

### Modelo de Primer Orden mas Tiempo Muerto (POMTM)

$$P(s1) = \frac{Kp e^{-Ls}}{Ts + 1}$$

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{50\% - 0\%}{25\% - 0\%} = 2$$

$$T = 0,9102 (t_{75} - t_{25}) = 0,9102 (6,2 \text{ seg} - 3,7 \text{ seg}) \rightarrow T = 2,276 \text{ seg}$$

$$L = 1,2620 t_{25} - 0,2620 t_{75} = (1,2620 \times 3,7 \text{ seg}) - (0,2620 \times 6,2 \text{ seg})$$

$$L = 3,045 \text{ seg}$$

$$P(s1) = \frac{2 e^{-3,045 s}}{2,276 s + 1}$$

### Modelo de Polo Doble mas Tiempo Muerto (PDMTM)

$$P(s2) = \frac{Kp e^{-L's}}{(T's + 1)^2}$$

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{50\% - 0\%}{25\% - 0\%} = 2$$

$$T' = 0,5776 (t_{75} - t_{25}) = 0,5776 (6,2 \text{ seg} - 3,7 \text{ seg}) \rightarrow T' = 1,444 \text{ seg}$$

$$L' = 1,5552 t_{25} - 0,5552 t_{75} = (1,5552 \times 3,7 \text{ seg}) - (0,5552 \times 6,2 \text{ seg})$$

$$L' = 2,312 \text{ seg}$$

$$P(s2) = \frac{2 e^{-2,312 s}}{(1,444 s + 1)^2}$$

### Modelo de Segundo Orden mas Tiempo Muerto (SOMTM)

$$P(s3) = \frac{Kp e^{-L''s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{50\% - 0\%}{25\% - 0\%} = 2$$

$$L'' = L' = 2,312$$

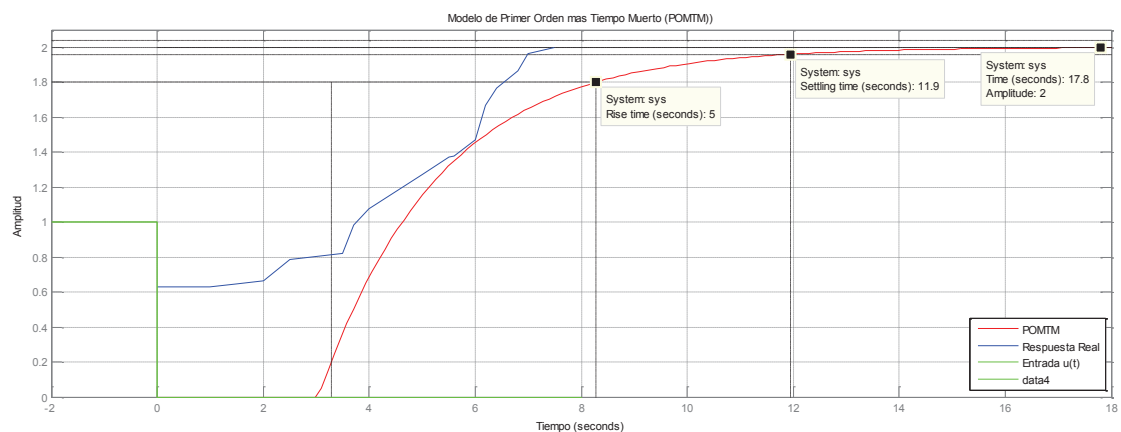
$$a = \frac{t_{50} - L' - 1,4362T'}{1,9844 T' - t_{50} + L'} = \frac{5 - 2,312 - 1,4362 \times 1,444}{1,9844 \times 1,444 - 5 + 2,312} \rightarrow a = 3,46$$

$$T'' = \frac{2 T'}{1 + a} = \frac{2 \times 1,444}{1 + 3,46} \rightarrow T'' = 0,6475$$

$$T_1 = T'' = 0,6475 ; T_2 = aT'' = 3,46 \times 0,6475 \rightarrow T_2 = 2,24$$

$$P(s3) = \frac{2 e^{-2,312 s}}{(0,6475 s + 1)(2,24 s + 1)}$$

Respuesta a una entrada paso unitario de la planta real y sus funciones de transferencia equivalentes:



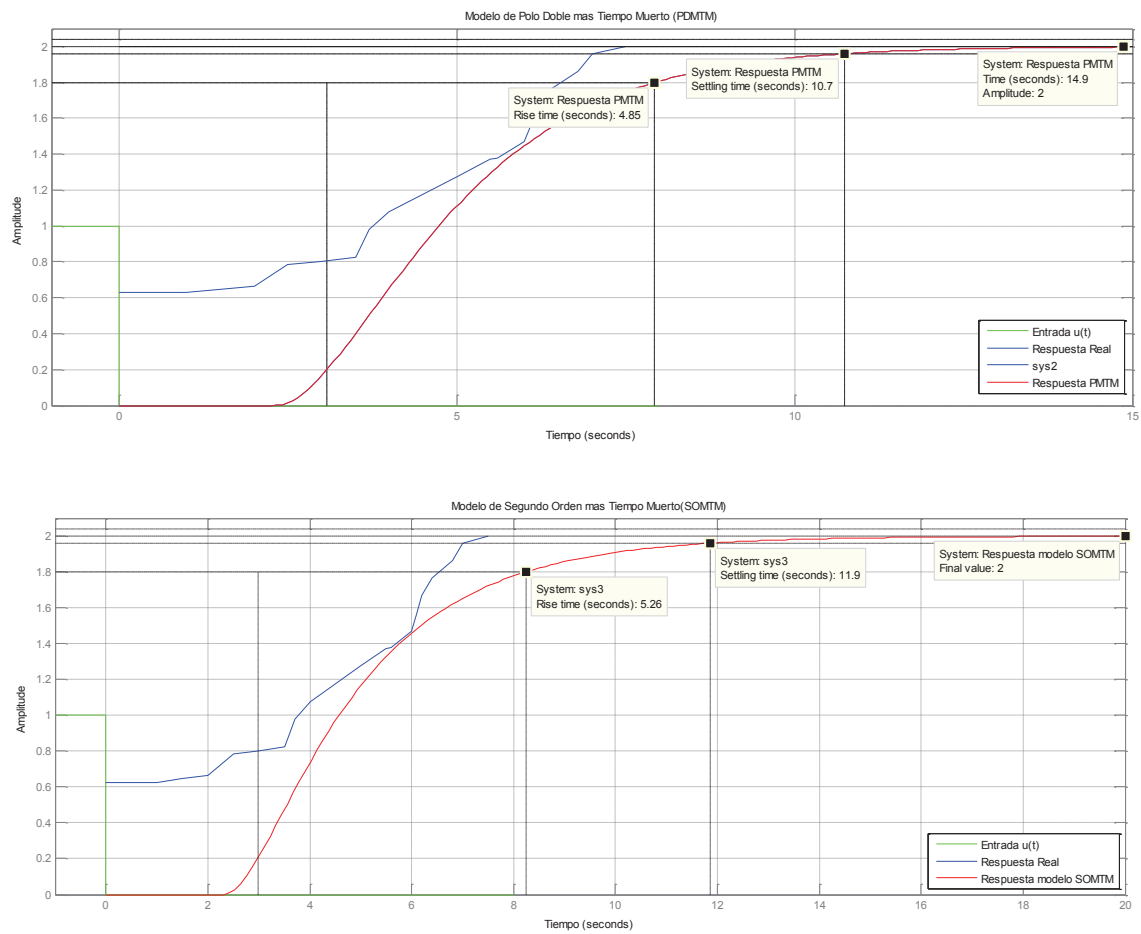


Figura 5.14 Respuesta de Modelos sistema de Control de CO determinados

Del Tercer modelo, a través de la gráfica se manipula el tiempo muerto a 1,5 segundos, quedando nuestro modelo:

$$G(s) = \frac{2 e^{-1,5 s}}{(0,6475 s + 1)(2,24 s + 1)}$$

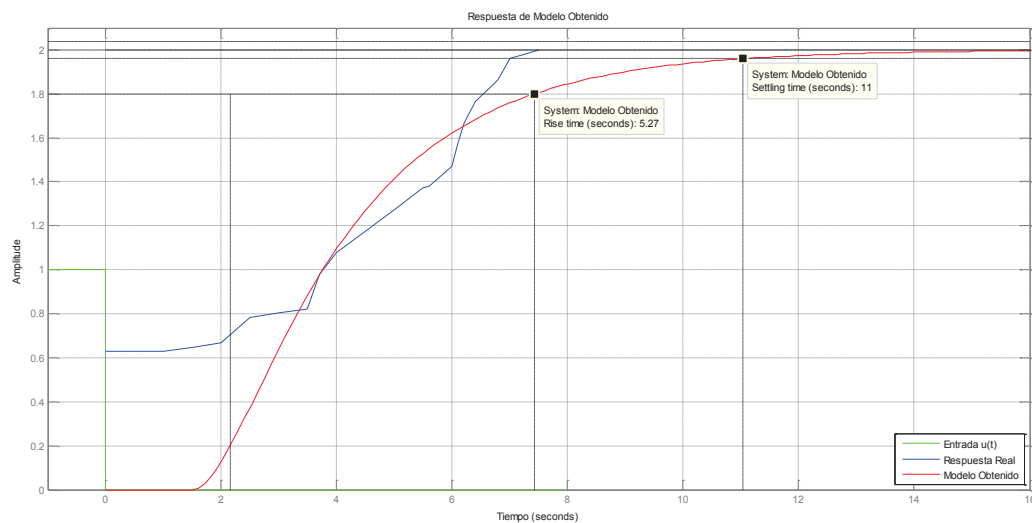


Figura 5.15 Ajuste de tiempo Muerto en modelo de control de CO

### 5.5.4 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADOR PID DE MONÓXIDO DE CARBONO

El control PID se ajusta a partir del método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols, el sistema se caracteriza a partir de dos parámetros: L y T, obtenidos a partir de la respuesta a lazo abierto a una entrada paso

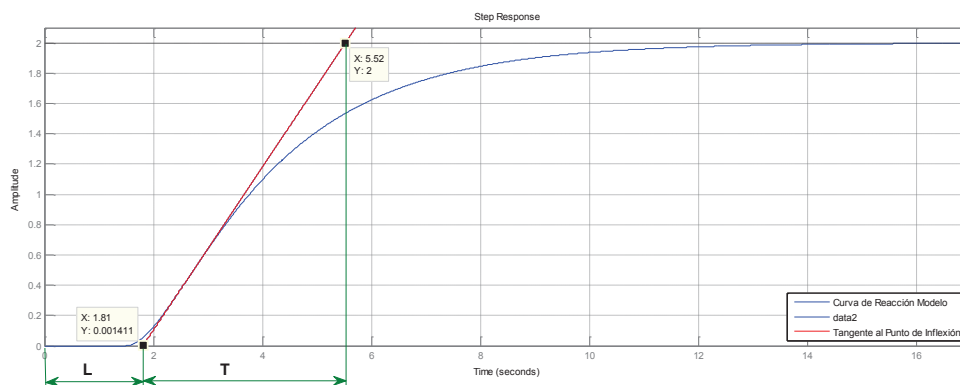


Figura 5.16 Ajuste parámetros PID control de CO

De la figura se obtiene:

$$L = 1,8074 \quad \text{y} \quad T = 3,7072$$

Los parámetros PID según el método son:

$$Kp = 1,2 \times \frac{T}{KL} = 1,2 \times \frac{3,7072}{2 \times 1,8074} \rightarrow Kp = 1,2307$$

$$ki = \frac{1}{2L} = \frac{1}{2 \times 1,8074} \rightarrow Ki = 0,2766 ; Ti = 3,6148 \text{ seg}$$

$$kd = 0,5 L = 0,5 \times 1,8074 \rightarrow kd = 0,9037 ; Td = 0,9037 \text{ seg}$$

Comparación entre parámetros calculados y parámetros reales:

Tabla 5.6 Desviación entre constantes teóricas y reales PID de CO

Parámetro	Estudio	S. Real	Desviación <sup>i</sup>
Kp	1,2307	1,5026	18.1 %
Ti	3,6148	3,1260	13,5 %
Td	0,9037	0,3838	57,5 %

<sup>i</sup> La desviación toma como referencia el valor mayor.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación, respuestas del sistema regulado por auto regulación PLC (azul) y regulados teóricamente:

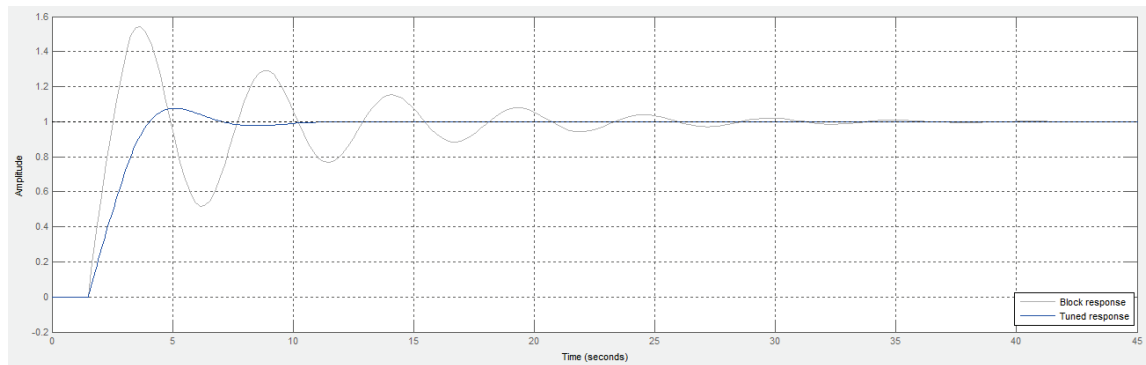
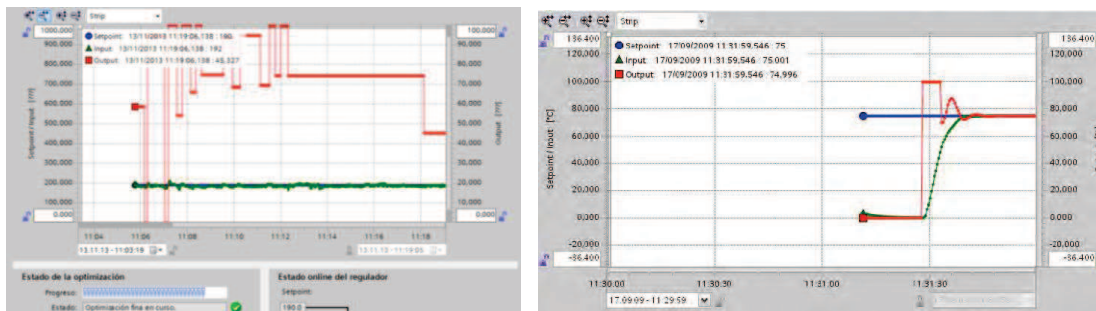


Figura 5.17 Comparación regulación parámetros PID teórico y real

### Puesta en marcha y autoajuste PID mediante PLC S7-1200 de Siemens



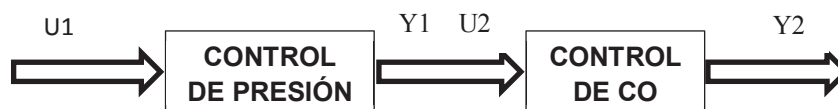
Autoajuste PID CO

Autoajuste Presión

Figura 5.18 Autosintonía real de parámetros PID de PLC

### 5.5.5 ESTRUCTURA COMPUESTA

Se puede definir el sistema como un sistema multivariable, está compuesto por dos entradas y dos salidas. Si se considera el sistema de control de presión, dicha variable está relacionada directamente con la temperatura interna del caldero y ésta a su vez con la cantidad de calor producido en la reacción que depende en gran proporción de la cantidad de aire de combustión que es la entrada del lazo de control de gases, los sistemas está interconectados en serie o llamado también cascada.





A continuación se determina el modelo de estados de las Funciones de transferencia equivalentes determinadas anteriormente, el principal inconveniente se presenta en el tiempo muerto que posee cada una de ellas, para lo cual se deben utilizar modelos de aproximación, para el caso se determina con la ayuda de Matlab.

### Sistema 1: Lazo de Control de Presión

*Función de transferencia:*

$$G(s) = \frac{e^{-174,437s}}{(809,165s + 1)(971s + 1)}$$

*Modelo de Estados*

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -0,002266 & -0,001303 \\ 0,0009766 & 0 \end{pmatrix}}_{A_1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0,03125 \\ 0 \end{pmatrix}}_{B_1} u_1$$

$$y_1 = \underbrace{(0 \quad 0,04171)}_{C_1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

### Sistema 2: Lazo de control de CO

*Función de transferencia:*

$$G(s) = \frac{2 e^{-1,5s}}{(0,6475s + 1)(2,24s + 1)}$$

*Modelo de Estados*

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -1,993 & -0,6897 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}}_{A_2} \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}}_{B_2} u_2$$

$$y_2 = \underbrace{(0 \quad 1,379)}_{C_2} \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

Si se considera que la tasa de variación de presión de salida es proporcional a la cantidad de combustible quemado y que de dicha cantidad dependen las emisiones de CO se puede establecer un solo sistema con:  $u=u_1$ ,  $y=y_2$ , por

construcción se cumple  $u_2=y_1$ ; además las variables de estado serán la unión de los subsistemas:

$$X = \begin{pmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

Reemplazando  $u_2$  por  $y_1$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_{s1} = A_1 x_{s1} + B_1 u_1 \\ \dot{x}_{s2} = A_2 x_{s2} + B_2 (C_1 x_{s1} + D_1 u_1) \\ y_2 = C_2 x_{s2} + D_2 (C_1 x_{s1} + D_1 u_1) \end{cases}$$

El sistema resultante es:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,002266 & -0,001303 & 0 & 0 \\ 0,0009766 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,04171 & -1,993 & -0,6897 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,03125 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u$$

$$y = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1,379) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

### 5.5.6 CONSIDERACIONES DE MODELO

En el análisis del sistema generador de vapor como se indicó, existen variables que influyen directamente en el comportamiento del caldero, algunas de ellas se logran minimizar tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

#### **Influencia de la Presión Atmosférica y Temperatura Ambiente**

La presión atmosférica está relacionada directamente con la altura del lugar. La Figura siguiente muestra el efecto de la altura en el volumen de aire requerido; para el caso no se consideran representativos los efectos mencionados, debido que el caldero es fijo.

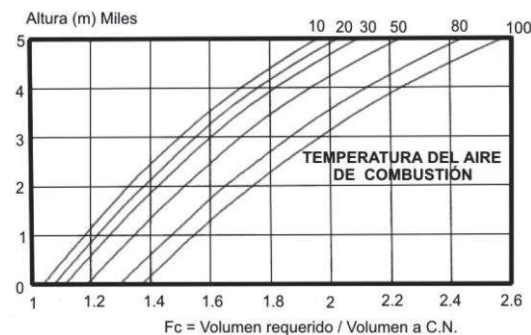


Figura 5.19 Relación del volumen de aire con la altura y temperatura [47]

### Influencia de la Humedad relativa

Según la Ecuación 1-10:  $V_{ah} = V_{as} + 1,336 \times M_{as} \times w$ ; se verifica que si la humedad relativa aumenta, aumenta también la cantidad de aire requerido para la combustión; este efecto puede ser verificado en la combustión de 1kg de combustible, donde se obtiene [48]:

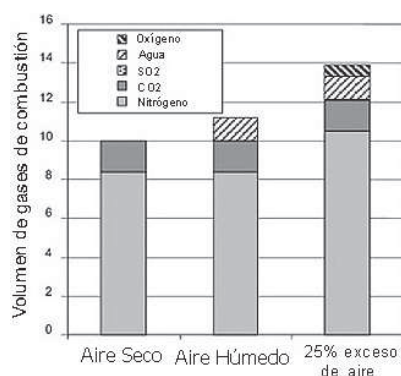


Figura 5.20 Efecto de dilución del contenido en humedad y del exceso de aire [48]

Tabla 5.7 Comparación entre composición relativa [48]

	Nitrógeno	CO2	SO2	Agua	Oxígeno
Aire Seco	82,6 %	16 %	0,20 %	0 %	0 %
Aire Húmedo	74,7 %	14,4 %	0,18 %	10,7 %	0 %
25 % Exc. Aire Seco	82,8 %	12,7 %	0,16 %	0 %	4,4 %
25% Exc. Aire Húmedo	75,6 %	11,6 %	0,14 %	8,7 %	4 %

Según se ha observado, las variaciones de humedad no producen cambios significativos en la variable de salida; aunque son perceptibles, el sistema presenta cambios únicamente en el contenido de humedad de los gases de salida; la temperatura de combustión no se ve afectada, ya que, la tasa calórica



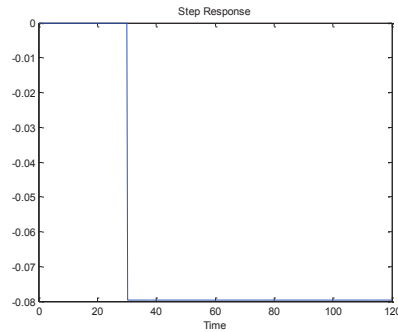


Figura 5.22 Respuesta del modelo de llenado contenido líquido

El modelo de variación de volumen de agua contenido, muestra el cambio de energía calórica en el interior del caldero y con ello la desviación de presión ante un llenado; el efecto es transitorio con un tiempo máximo medido de 3 minutos; el tiempo restante, se considera un nivel constante al menos para el caso de estudio; como se observa en la respuesta del sistema, el llenado de agua se manifiesta como un descenso de presión según la ecuación:

$$Gi(s) = \frac{-0,0797 e^{-30 s}}{1 + 1 \times 10^{-6} s} \quad \text{Para: } t_0 \leq t \leq t_f$$

Si consideramos la función de Transferencia equivalente del sistema se tiene:

$$Gp(s) = \frac{e^{-174,437s}}{(809,165 s + 1)(971 s + 1)}$$

El caldero en los instantes de llenado tendrá una función de transferencia equivalente:

$$G(s) = Gp(s) \times Gi(s) = \frac{e^{-174,437s}}{(809,165 s + 1)(971 s + 1)} \cdot \frac{-0,0797 e^{-30 s}}{1 + 1 \times 10^{-6} s}$$

$$G(s) = \frac{-0,0797 e^{-204,437s}}{(809,165 s + 1)(971 s + 1)(1 + 1 \times 10^{-6} s)}$$

Se puede definir entonces un modelo general del sistema, en funcionamiento estable:

$$G(s) = \begin{cases} \frac{e^{-174,437s}}{(809,165 s + 1)(971 s + 1)} & ; \text{ Nivel de Líquido contenido constante} \\ \frac{-0,0797 e^{-204,437s}}{(809,165 s + 1)(971 s + 1)(1 + 1 \times 10^{-6} s)} & ; \text{ Nivel de Líquido contenido variable} \end{cases}$$

En el ciclo de funcionamiento del caldero se identifican 5 etapas:

1. Etapa de Rezago.- El sistema se ha presurizado hasta la presión máxima permitida, el generador permanece apagado hasta que se inicie un nuevo ciclo de funcionamiento.
2. Etapa de Encendido.- El sistema alcanzó la presión mínima e inicia la secuencia de encendido del caldero, se realizan todas las operaciones necesarias para iniciar la combustión; en esta etapa aún no se aporta energía calórica al sistema. Depende de la velocidad con la que se ejecuten las acciones de inicio de combustión. Esta etapa tiene una duración de 1 minuto (Tiempo de encendido). Esta etapa se define como el tiempo muerto del sistema.
3. Etapa de Retardo.- El caldero ha sido encendido (inicio de combustión), esta etapa considera el tiempo que le toma a la acción de control alterar la variable de salida, realmente puede relacionarse con el tiempo que tardan los gases calientes en circular por las 3 cavidades del caldero (3 pasos). Esta etapa se observa en los modelos obtenidos, en régimen permanente tiene un valor de 175 segundos. Se define como Tiempo de retardo.
4. Etapa de Funcionamiento Nominal.- En esta etapa el sistema de control actúa directamente sobre la variable hasta alcanzar la presión máxima permitida, instante en que, inicia el periodo de apagado del caldero.
5. Etapa de Apagado Normal.- Esta etapa considera el tiempo que le toma al caldero ejecutar las acciones secuenciales para su apagado. En el caso real le tarda 1,5 minutos.

### 5.5.7 REDUCCIÓN DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

El modelo de estados hallado en la estructura compuesta se describe como:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,002266 & -0,001303 & 0 & 0 \\ 0,0009766 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,04171 & -1,993 & -0,6897 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,03125 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u$$

$$y = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1,379) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

Utilizando el modelo en espacio de estados, se puede demostrar que el modelo general del caldero es:

$$G_{Total} = \frac{1,755 \times 10^{-6}}{s^4 + 2s^3 + 0,7s^2 + 0,0016s + 8,78 \times 10^{-7}}$$

$$G_{Total} = \frac{1,755 \times 10^{-6}}{(s + 1,5469)(s + 0,001235)(s + 0,4459)(s + 1,5469)}$$

Se pueden establecer cuatro funciones parciales de transferencia, lo que ayudará a encontrar la relación existente entre la función equivalente y el caldero real.

$$G_{Total} = 1,755 \times 10^{-6} \left( \frac{1}{\underbrace{s + 1,5469}_{\tilde{G}_{T1}}} \cdot \frac{1}{\underbrace{s + 0,001235}_{\tilde{G}_{T2}}} \cdot \frac{1}{\underbrace{s + 0,4459}_{\tilde{G}_{T3}}} \cdot \frac{1}{\underbrace{s + 1,5469}_{\tilde{G}_{T4}}} \right)$$

Respuestas de las funciones parciales:

$$\text{En } G_{T1}: Ts_1 = 1 / 1,5469 = 0,6465$$

$$\text{En } G_{T2}: Ts_2 = 1 / 0,001235 = 809,72$$

$$\text{En } G_{T3}: Ts_3 = 1 / 0,4459 = 2,24$$

$$\text{En } G_{T4}: Ts_4 = 1 / 1,5469 = 0,6465$$

Se determina como representativa la función  $G_{T2}$ , por el tiempo de respuesta; en la cual:

$$G_{T2} = \frac{1,755 \times 10^{-6}}{s + 0,001235}$$

A partir de un análisis de transferencia de temperatura, se puede determinar una función de transferencia determinada por la relación entre la variación de temperatura y el flujo calorífico.

$$G = \frac{\Delta T c(s)}{\Delta q_{in}(s)} = \frac{1}{C_{TH} s + \left( \frac{1}{R_{TH}} + \rho Q_e x c \right)}$$

$C_{TH}$ , capacitancia térmica [kcal / °K]

$R_{TH}$ , resistencia térmica [°K / kcal]

$\rho$ , densidad del agua [kg / m<sup>3</sup>]

$c$ , calor específico [kcal / kg °K]

$Q_e$ , caudal de agua de ingreso [m<sup>3</sup> / s]

Capacidad del caldero nivel normal: 1100 Gal

Densidad del agua 1000 kg/m<sup>3</sup>

Capacidad caldero nivel lleno: 1300 Gal

$C_{TH} = 2058 \text{ J/kg K}$

Caldero lleno: 10804 lb = 4910,91 kg

Caldero normal: 9147 lb = 4157,73 kg

$C_{TH} = 2058 \text{ [J/kg K]} = 2058 \text{ [J/kg K]} \times 4157,73 \text{ [kg]} \times 0,24 \times 10^{-3} \text{ [kcal/J]}$

$C_{TH} = 2,05 \times 10^3 \text{ [Kcal/K]}$

$1/R_{TH} = 47,7 \text{ [K/mW]} = 47,7 \text{ [Km/W]} \times 6 \text{ [m]} = 286,2 \text{ [K/W]}$

$1/R_{TH} = 1,2 \times 10^3 \text{ [K/Kcal]}$

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

$c = 1 \text{ kcal /kg K}$

Flujo de vapor aproximado: 6900 lb/h

$Q_e = 15,18 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0042 \text{ m}^3/\text{s}$

$$G = \frac{\Delta T c(s)}{\Delta q in(s)} = \frac{1}{C_{TH} s + (R_{TH} + \rho Q_e x c)}$$

$$G = \frac{1}{2,05 \times 10^3 s + \left( \frac{1}{1,2 \times 10^3} + 1000 \times 0,0042 \times 1 \right)}$$

$$G = \frac{1}{2,05 \times 10^3 s + (4,2008)} \rightarrow G = \frac{4,88 \times 10^{-4}}{s + 0,0020}$$

Ecuación en la cual se verifica que el modelo se aproxima a la respuesta real del sistema.

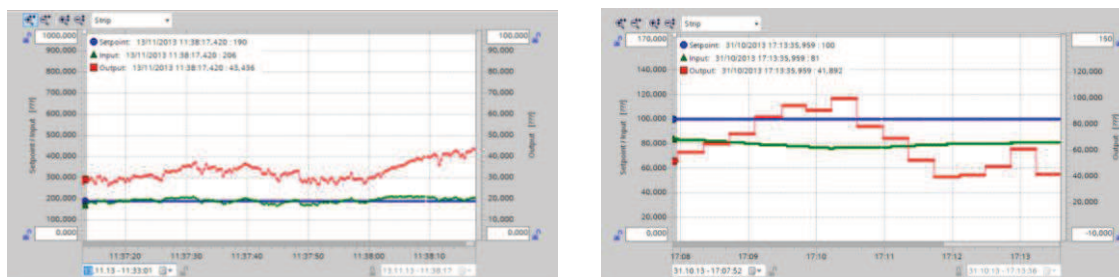
## 5.6 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO:

El sistema responde a los requerimientos de encendido y apagado, tal y como se diseñó, las alarmas y límites de seguridad se han comprobado.



### 5.6.1 RESPUESTA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el valor de presión de entrada (rojo), el valor de set point (azul) y la acción de control para el modutrol, después de haber calibrado el PID de presión.



Control Emisiones de CO

Control Presión

Figura 5.23 Respuesta real de los sistemas de Control

### 5.6.2 TEMPERATURA DE LLAMA:

La temperatura y color de llama nos pueden dar una idea breve del tipo de combustión que se tiene; sin embargo, puede producirse por razones adversas y resulta engañosa a la vista. Por tanto la visualización del color de llama sirve como indicativo y de evaluación rápida, no debe tomarse como parámetro de buen funcionamiento. [50]

Tabla 5.8. Estimación de Temperatura de llama según color. [50]

COLOR	Temperatura (°C)
Rojo Suave	475
Rojo Suave a rojo oscuro	475 - 650
Rojo oscuro a rojo cereza	650 - 750
Rojo cereza a rojo cereza brillante	750 - 825
Rojo cereza brillante a naranja	825 - 900
Naranja a Amarillo	900 - 1090
Amarillo a amarillo brillante	1090 - 1320
Amarillo brillante a blanco	1320 - 1540

Según la guía de combustión emitida por la empresa FIMACO S.A. [51] el color de los colores de llama cuando se utiliza Diesel son:

Aire Insuficiente: Llama con tendencia oscura.

Aire Correcto: Llama rojiza – Amarilla brillante.

Aire en exceso: Llama muy clara y brillante

### 5.6.3 CÁLCULO COMBUSTIÓN ESTEQUIOMÉTRICA

#### Contenido Diesel N° 02

Como ya se describió anteriormente, el caudal de Combustible varía entre: 10,7 GPH y 37,1 GPH, a una presión de 10 PSI. En el lapso de una hora se tiene que el Volumen mínimo es 10,7 galones y el Volumen máximo es 37,1 galones.

Tomando como referencia las características del Diesel N° 2 adjuntas en el **ANEXO 8**.

$$m_{min} = \delta \cdot V_{min} = 7,33 \frac{lb}{gal} \times 10,7 gal = 78,43 lb \times 0,4536 \frac{kg}{lb}$$

$$m_{min} = 35,58 Kg \text{ de Diesel mínimo}$$

$$m_{max} = \delta \cdot V_{max} = 7,33 \frac{lb}{gal} \times 37,1 gal = 271,94 lb \times 0,4536 \frac{kg}{lb} .$$

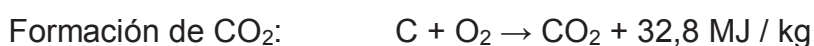
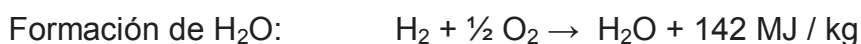
$$m_{max} = 123,35 Kg \text{ de Diesel máximo}$$

Tabla 5.9. Proporciones Contenido de Diesel N°02

	Porcentaje	Masa mínima	Masa máxima
Carbono	85 %	30,243 kg	104,8475 kg
Nitrógeno	1 %	0,3558 kg	1,2335 kg
Hidrógeno	12,2 %	4,34076 kg	15,0487 kg
Azufre	1,8 %	0,64044 kg	2,2203 kg
Total	100 %	35,58 kg	123,35 kg

#### Combustión completa:

A continuación se calculará el caudal de aire necesario para obtener una combustión completa. Una combustión completa produce las siguientes reacciones químicas, según las **Ecuaciones: 1-1, 1-4 y 1-5**:



De la **Ecuación 1-6** se tiene que la cantidad de oxígeno necesaria es:

$$m_{O_2} = 32 \cdot (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) \text{ Kg/kg combustible}$$

$$m_{O_{2min}} = 32 \left( \left( \frac{0,85}{12} \right) + \left( \frac{0,122}{4} \right) + \left( \frac{0,018}{32} \right) \right) \times 35,58 \text{ kg} = 116,01 \text{ kg}$$

$$m_{O_{2max}} = 32 \left( \left( \frac{0,85}{12} \right) + \left( \frac{0,122}{4} \right) + \left( \frac{0,018}{32} \right) \right) \times 123,35 \text{ kg} = 402,20 \text{ kg}$$

En el cálculo anterior no se considera el oxígeno pues no se tiene información del contenido en el diesel. El volumen de aire necesario para obtener las cantidades de oxígeno determinadas se calculan utilizando la **Ecuación 1-9**, reemplazando el valor de volumen de gas a 1 atm de presión y 20 °C de temperatura según la **Tabla 1.3**:

V. de aire seco necesario:  $V_{as} = 24,04 \cdot 4,77 \cdot (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) \text{ m}^3/\text{kg combustible}$

$$V_{Aireseco_{min}} = 24,04 \cdot 4,77 \cdot \left( \left( \frac{0,85}{12} \right) + \left( \frac{0,122}{4} \right) + \left( \frac{0,018}{32} \right) \right) \times 35,58 \text{ kg} = 415,73 \text{ m}^3$$

$$V_{Aireseco_{max}} = 24,04 \cdot 4,77 \cdot \left( \left( \frac{0,85}{12} \right) + \left( \frac{0,122}{4} \right) + \left( \frac{0,018}{32} \right) \right) \times 123,35 \text{ kg} = 1441,28 \text{ m}^3$$

La masa de aire seco necesario se calcula a partir de la **Ecuación 1-7**:

Aire seco necesario:  $M_{as} = 4,32 \cdot 32 \cdot (C/12 + H/4 + S/32 - O/32) \text{ Kg}$

$$m_{Aireseco_{min}} = 4,35 \times 116,01 \text{ kg} = 504,64 \text{ kg de aire seco.}$$

$$m_{Aireseco_{max}} = 4,35 \times 402,20 \text{ kg} = 1749,57 \text{ kg de aire seco.}$$

En el **ANEXO 9** columna 4 se puede encontrar la humedad específica del aire ( $w$ ) en g/Kg de aire seco; para una temperatura de 20°C,  $w = 6,672 \text{ g/kg}$ . El volumen de aire húmedo necesario se determina usando la **Ecuación 1-10**.

V. aire húmedo necesario:  $V_{ah} = V_{as} + 1,336 \cdot M_{as} \cdot w \quad \text{m}^3/\text{kg combustible.}$

$$V_{ah_{min}} = 415,73 \text{ m}^3 + (1,336 \text{ m}^3/\text{kg} \cdot 504,64 \text{ kg} \cdot 6,672 \times 10^{-3} \text{ kg / kg}) = 420,23 \text{ m}^3$$

$$V_{ah_{max}} = 1441,28 \text{ m}^3 + (1,336 \text{ m}^3/\text{kg} \cdot 1749,57 \text{ kg} \cdot 6,672 \times 10^{-3} \text{ kg / kg}) = 1456,87 \text{ m}^3$$

$$Q_{min} = \frac{V_{min}}{t} = \frac{420,23 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 420,23 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_{max} = \frac{V_{max}}{t} = \frac{1456,87 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 1456,87 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

### Exceso de aire

Luego de realizar el análisis de gases se determinó que el índice de exceso de aire adecuado para el caldero es 1,28; cuando teóricamente para combustibles líquidos el índice está comprendido entre 1,1 y 1,2.

De la **Ecuación 1-18** se tiene que:  $Aire \text{ Real} = n \times Aire \text{ Teórico}$

$$Aire \text{ Real}(\text{mínimo}) = 1,28 \times 420,23 \text{ m}^3 = 537,89 \text{ m}^3$$

$$Aire \text{ Real}(\text{máximo}) = 1,28 \times 1456,87 \text{ m}^3 = 1864,79 \text{ m}^3$$

Además, el fabricante del quemador indica que se puede considerar el caudal de aire de dispersión como 1/3 del caudal máximo de combustible.

Realmente no se producen grandes variaciones pues se debe mantener la presión suficiente para pulverizar el combustible, para el cálculo se considera el flujo de aire de pulverización constante,

$$\text{Flujo de aire} = 37,1 / 3 \text{ (gal / h)} = 12,4 \text{ gal / h}$$

$$V = 12,4 \text{ gal} \times 3,785 \times 10^{-3} \text{ (m}^3 / \text{gal)} = 0,047 \text{ m}^3$$

No es muy significativo con respecto al aire total de combustión. A continuación el caudal de aire real:

$$Q_{minreal} = \frac{V_{minreal}}{t} = \frac{537,84 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 537,84 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_{maxreal} = \frac{V_{maxreal}}{t} = \frac{1864,74 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 1864,74 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

### Gases expulsados

Producto de ingresar exceso de aire a la combustión se generan reacciones secundarias, con los productos de la reacción y más humos a continuación se calcularán, según la **Ecuación 1- 12**:

$$V_{gc} = \underbrace{2C + 0,75S + 0,86N}_{\text{Compuestos}} + \underbrace{\left(\frac{79,05}{20,95}\right) \cdot 24,04 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32}\right)}_{\text{Nitrógeno introducido en aire}} \quad \frac{\text{m}^3 \text{ de gas}}{\text{kg de combustible}}$$

$$V_{gc_{min}} = \left( 2(0,85) + 0,75(0,018) + 0,86(0,01) + 24,04 \cdot \left(\frac{79,05}{20,95}\right) \left(\frac{0,85}{12} + \frac{0,122}{4} + \frac{0,018}{32}\right) \right) \times 35,58 \text{ m}^3$$

$$V_{gc_{min}} = \left( \frac{60,4860}{\text{Carbono}} + \frac{0,4803}{\text{Azufre}} + \frac{0,3060}{\text{Nitrógeno Diesel}} + \frac{328,8627}{\text{Nitrógeno Aire}} \right) \text{ m}^3$$

$$V_{gc_{min}} = 390,135 \text{ m}^3$$

$$V_{gc_{max}} = \left( 2(0,85) + 0,75(0,018) + 0,86(0,01) + 24,04 \cdot \left(\frac{79,05}{20,95}\right) \left(\frac{0,85}{12} + \frac{0,122}{4} + \frac{0,018}{32}\right) \right) \times 123,35 \text{ m}^3$$

$$V_{gc_{min}} = \left( \frac{209,695}{\text{Carbono}} + \frac{1,6652}{\text{Azufre}} + \frac{1,0608}{\text{Nitrógeno Diesel}} + \frac{1140,113}{\text{Nitrógeno Aire}} \right) \text{ m}^3$$

$$V_{gc_{max}} = 1352,53 \text{ m}^3$$

#### Caudal de Gases Secos de Salida:

$$Q_{minreal} = \frac{V_{gc_{min}}}{t} = \frac{390,135 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 390,135 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_{maxreal} = \frac{V_{gc_{max}}}{t} = \frac{1352,53 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 1352,53 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

#### Vapor de Agua Contenido en los Gases:

$$V_{H_2O} = \frac{24,04}{18} \frac{\text{m}^3 H_2O}{\text{Kg de combustible}}$$

$$V_{H_2O_{min}} = \frac{24,04}{18} \times 35,58 \frac{\text{kg}}{\text{Kg}} \text{ m}^3 H_2O = 47,52 \text{ m}^3 H_2O$$

$$V_{H_2O_{max}} = \frac{24,04}{18} \times 123,35 \frac{\text{kg}}{\text{Kg}} \text{ m}^3 H_2O = 164,74 \text{ m}^3 H_2O$$

### 5.6.4 EMISIONES REALES DE GASES:

#### Determinación de concentraciones a partir de muestras:

Para verificar el funcionamiento del sistema se realizó un análisis de gases a baja, media y alta potencia, en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.10 Determinación de Emisiones Gaseosas

<b>MÍNIMA POTENCIA</b>					
	<b>Oxígeno (%)</b>	<b>Dióxido de Carbono (%)</b>	<b>Monóxido de Carbono (ppm)</b>	<b>Exceso de Aire (%)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
<b>1</b>	5,54	11,47	4	33,1	87,9
<b>2</b>	5,52	11,49	3	33	87,8
<b>3</b>	5,53	11,48	3	33	87,8
<b>4</b>	5,53	11,47	3	33,1	87,7
<b>5</b>	5,54	11,47	2	33,1	87,6
<b>6</b>	5,52	11,48	2	33	87,5
<b>7</b>	5,58	11,44	2	33,5	87,5
<b>8</b>	5,59	11,44	2	33,5	87,4
<b>Media</b>	5,54	11,47	2,63	33,16	87,65
<b>Desviación</b>	0,03	0,02	0,74	0,21	0,18

<b>MEDIA POTENCIA</b>					
	<b>Oxígeno (%)</b>	<b>Dióxido de Carbono (%)</b>	<b>Monóxido de Carbono (ppm)</b>	<b>Exceso de Aire (%)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
<b>1</b>	6,57	10,71	0	42,1	86,1
<b>2</b>	6,54	10,73	0	41,8	85,9
<b>3</b>	6,57	10,71	0	42	85,8
<b>4</b>	6,56	10,71	0	42	85,7
<b>5</b>	6,59	10,69	0	42,2	85,6
<b>6</b>	6,61	10,68	0	42,4	85,6
<b>7</b>	6,49	10,76	0	41,3	85,6
<b>8</b>	6,43	10,81	0	40,8	85,5
<b>Media</b>	6,55	10,73	0,00	41,83	85,73
<b>Desviación</b>	0,06	0,04	0,00	0,53	0,20

<b>MÁXIMA POTENCIA</b>					
	<b>Oxígeno (%)</b>	<b>Dióxido de Carbono (%)</b>	<b>Monóxido de Carbono (ppm)</b>	<b>Exceso de Aire (%)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
<b>1</b>	2,06	14,06	6	10,1	87
<b>2</b>	1,95	14,15	6	9,5	86,8
<b>3</b>	1,89	14,19	7	9,2	86,7
<b>4</b>	1,92	14,17	7	9,3	86,7
<b>5</b>	1,86	14,21	7	9	86,6
<b>6</b>	1,82	14,24	7	8,8	86,6
<b>7</b>	1,8	14,26	8	8,7	86,6
<b>8</b>	1,79	14,26	7	8,7	86,5
<b>Media</b>	1,89	14,19	6,88	9,16	86,69
<b>Desviación</b>	0,09	0,07	0,64	0,48	0,16

## Emisiones Gaseosas entre sistemas de control

Los siguientes parámetros se han tomado del **ANEXO 12**.

Tabla 5.11 Comparación de emisiones entre los sistema de control

PARÁMETRO	UNIDAD	CONTROL ANTIGUO	NUEVO CONTROL
Flujo de Gas seco	m <sup>3</sup> /h	1953,10	706,20
Temperatura	°C	144,10	135,40
Oxígeno	%	9,44	5,55
Dióxido de Carbono	%	8,57	11,47
Monóxido de Carbono	ppm	3,00	3,00
Dióxido de Azufre	ppm	85,00	42,00
Óxidos de Nitrógeno	ppm	55,00	65,00
Exceso de Aire	%	82,80	33,00
Eficiencia	%	85,60	87,7

Las comparaciones se realizan en condiciones análogas, el sistema antiguo trabajaba únicamente a baja potencia. En el **ANEXO 12** Tema 2 se incluye el análisis de gases del nuevo sistema a baja, media y alta potencia de combustión.

La composición de gases expulsados se puede determinar también utilizando las curvas mostradas en la Figura 5.24:

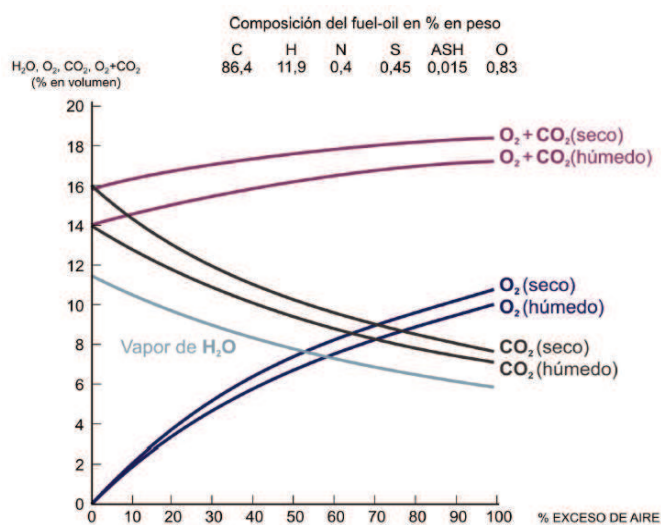


Figura 5.24 Composición de gases expulsados en función del exceso de para Diesel (poder calorífico aprox. 18700 BTU/lb) [16]

5.6.5 RENDIMIENTO

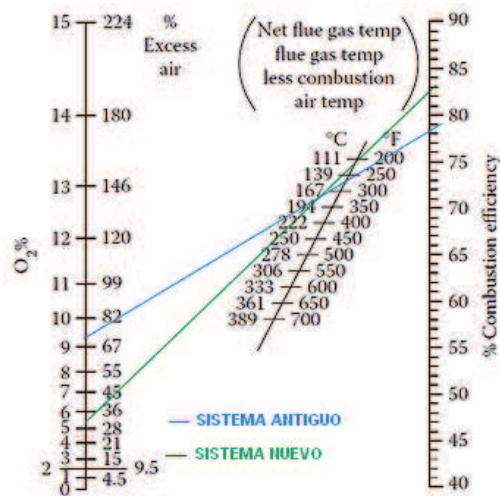


Figura 5.25 Curva de eficiencia de combustión del caldero en base al exceso de aire [17]

Para determinar la eficiencia, se puede usar la **Figura 5.25**, a partir de los valores de la concentración de oxígeno y temperatura de salida de gases, con un error aproximado del 10% en base a las lecturas reales.

5.6.6 AHORRO POR OPTIMIZACIÓN

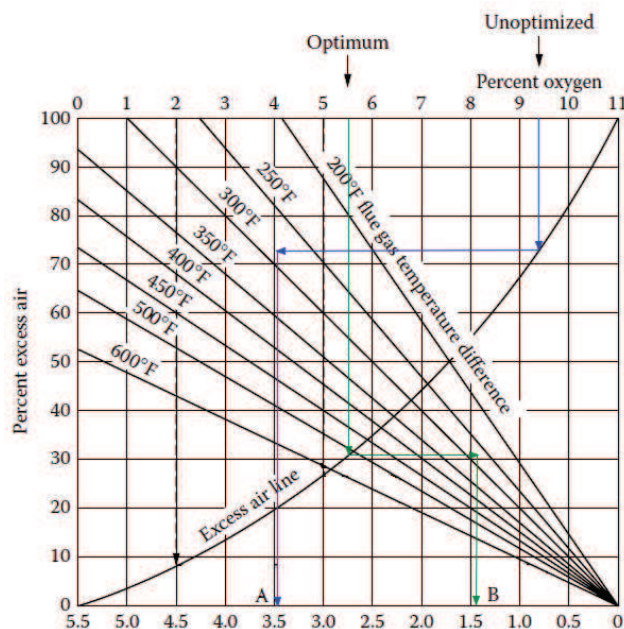


Figura 5.26 Ahorro de combustible por reducción de exceso de oxígeno [17]

En la **Figura 5.26**, se determina el ahorro de combustible; a partir de la concentración de oxígeno en los gases de salida y su temperatura, se encuentran



los puntos A (Sistema no Optimizado) y B (Sistema Optimizado), el porcentaje de ahorro de combustible se obtiene:

Concentración de Oxígeno Sistema Antiguo: 9,44%

Concentración de Oxígeno Sistema Nuevo: 5,55%

Temperatura de Gases Sistema Antiguo: 144,10 °C = 291,38 °F

Temperatura de Gases Sistema Nuevo: 135,40 °C = 275,72 °F

Potencial Ahorro de Combustible = A – B = 3,45% - 1,40% = 2,05%

Se estima un consumo diario de combustible de 200 Galones, por lo que se espera un ahorro de 4,1 Galones.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES:

- A partir del trabajo realizado se pudo comprender el funcionamiento de los sistemas requeridos para la producción de vapor; sistemas de control tradicionales, modernos y nuevas tendencias que buscan aumentar el rendimiento de los sistemas generadores de vapor a partir de la disminución de contaminantes al ambiente.
- Después del análisis de cada uno de los elementos constitutivos del sistema, manual de operación y en base a pruebas individuales, se pudo comprobar la lógica de funcionamiento del caldero; la misma que sirvió como referencia para el diseño de un nuevo sistema de control; además se pudo determinar elementos innecesarios para el funcionamiento del nuevo sistema y dotar de sensores que brinden mayor utilidad en la información sobre el estado de funcionamiento.
- Se desarrolló un HMI (Human Machine Interface), que permite visualizar el estado de funcionamiento del caldero, variables controladas, detección de alarmas y fallos; facilidad de manejo al operario priorizando la seguridad y evitando condiciones de riesgo.
- De resultados obtenidos a partir de pruebas realizadas se pueden encontrar deficiencias en el funcionamiento, ya sean de tipo eléctrico o mecánico. El caldero presentaba pérdidas aleatorias de llama, la cual activaba la alarma por fallo de combustión, después de un análisis minucioso se encontró que el filtro de combustible no estaba en buenas condiciones.
- Una vez ejecutado el estudio respectivo, se comprobó que el sistema generador de vapor no es un sistema aislado; su funcionamiento depende de otros sistemas que influyen directamente en su rendimiento; por tanto: la

calidad de vapor está relacionada con el sistema de tratamiento de agua, la de combustión depende del combustible y sistema de atomización correspondiente.

- El estado mecánico de un caldero influye en su rendimiento; en el desarrollo del proyecto se tuvo la oportunidad de presenciar la limpieza de los tubos de fuego del caldero que mejora la transferencia de calor y elimina los restos de material particulado acumulado.
- Los resultados finales se verificaron a partir de los análisis de gases realizados por el Centro de Investigación y Control Ambiental (CICAM) de la Escuela Politécnica Nacional. Se realizaron dos análisis: el primero aplicado al sistema de control convencional, y el segundo aplicado al sistema desarrollado en el presente proyecto. Se comprobó que la disminución de emisiones y aumento de la eficiencia del caldero influyen directamente en menores costos de mantenimiento y consumo de combustible.
- Se determinó teóricamente las cantidades de aire/combustible que reaccionan y el flujo de gases que producen, se verifican los valores calculados con las mediciones y se puede establecer un valor de aproximación debido a las condiciones ambientales.
- Se obtuvo un modelo equivalente del sistema a partir de datos experimentales en el caldero, este modelo permitirá aplicar sistemas de control más sofisticados.
- Principalmente se demuestra el aumento de eficiencia de combustión mediante la disminución del exceso de aire; el punto de funcionamiento se determinó a partir de mediciones en la chimenea.

## 6.2 RECOMENDACIONES:

- El montaje del sistema, contiene placas electrónicas que están diseñadas y construidas para el control de actuadores; se puede mejorar el sistema mediante la adquisición de drivers controlados directamente por el PLC, pues el controlador tiene esa funcionalidad.
- Para el acondicionamiento del sensor de llama se acopló el acondicionamiento del control antiguo; para el desarrollo de un nuevo sistema automático y seguro, es aconsejable adquirir un sensor de llama con salida analógica normalizada.
- El sistema de control implementado se puede extender a todas las fuentes de combustión de capacidades mayores para mejorar su desempeño, ya que el sistema no depende de la potencia de la fuente.
- Es importante realizar rutinas periódicas de inspección al sistema generador de vapor, para verificar que se cumplan los límites de seguridad y así garantizar el buen funcionamiento del sistema como lo recomienda la empresa FIMACO en su publicación: Instrucciones de manejo de Calderas.
- Es conveniente para conservar el correcto funcionamiento del caldero la realización de mantenimientos preventivos en lo referente a componentes y sistemas interconectados, como recomienda la empresa FIMACO en su publicación: Instrucciones de mantenimiento de Calderas.
- Se debe asegurar que el personal que manipule el caldero tenga conocimiento sobre su funcionamiento y esté debidamente capacitado. Para su manejo, se incluye el manual de funcionamiento (ver anexo 12).

## TRABAJOS CITADOS

- [1] COMUNIDAD EUROPEA, *Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC-MIE-AP1)*.
- [2] Ing. Héctor Izurieta INE and Villafuerte V. Ing. Washintong, *SISTEMAS DE CALDEROS*.
- [3] Pedro Abarca Bahamondes and Walter Dümmer Oswald, *Descripción de Calderas y Generadores de Vapor*.
- [4] ING. RAUL GUERRERO MORENO, "Relaciones Fundamentales,".
- [5] Spirax Sarco, *Guía de Referencia Técnica, Calderas y Accesorios*. Bueno Aires, 1999.
- [6] Raquel Soto T. and Paulo Valladares M., *Diseño de un caldero de baja potencia para la Fábrica de Ropa LOUREN*. Cuenca, 2011.
- [7] SpiraxSarco, *The Steam and Condensate Loop Block*.
- [8] Masters227. Scribd. [Online]. <http://es.scribd.com/doc/17302206/Calderas>
- [9] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía-IDAIE, "Guía técnica sobre procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas," Madrid, febrero de 2007.
- [10] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), "Guía técnica de diseño de centrales de calor eficientes," in *Guía técnica de diseño de centrales de calor eficientes*.
- [11] Ligna Padilla Daniel Ricardo,. Quito, Estudio de Factibilidad y rediseño del sistema de combustión para el sistema generador de vapor de la empresa "Interquimec Akzonobel".
- [12] TESTO, *Manual práctico Tecnología de medición en calderas.*, Tercera Edición.
- [13] Universidad de Burgos, *Manual de Calderas industriales*.
- [14] CONACYT, "EMISIONES ATMOSFÉRICAS FUENTES FIJAS PUNTUALES,".
- [15] Asunción Raña, *Unidades de medición empleadas en Calidad de Aire*. Ferrol-España, 2005.
- [16] S.G. Dukelow, *The control of Boilers.*: ISA Press, 1986.
- [17] B.G. Lipták, *Optimization of unit operations.*: Chilton Book Company, 1987.
- [18] David Lindsley, *Power Plant control and instrumentation. The control of boilers and HRSG systems*. London : Cambridge University Press, 2005.
- [19] Industrial Combustion, *D/Series HEV-E-DUTY Forced Draft Burners Brochure*. Wisconsin , 1998.

- [20] Industrial Combustion, *D/Series -Installation, Operation and Service Manual*. Wisconsin , 2008.
- [21] Industrial Combustion, *Manual de Instalación, operación y servicio quemadores Serie D*. Wisconsin.
- [22] ITT,.
- [23] Warrick™. (2013) Gems Sensors & Controls. [Online].  
<http://www.gemssensors.com/Products/Level/Warrick/Conductivity-Based-Liquid-Level-Control>
- [24] Warrick, *Type 1GXXX Liquid Level Controls Installation Instruction and Operation Manual*. Berkley, USA, 1 Mayo 1971.
- [25] Honeywell, *L404A Pressuretrol Controllers Manual*. Golden Valley, 1995.
- [26] Honeywell,.
- [27] Honeywell, *Modutrol IV Motors serie 90, Manual*. Golden Valley, 2002.
- [28] Azbil Corporation, *Flame safeguard System Selection Guide*. Japón, 2012.
- [29] Honeywell, *C7027A Minipeeper Ultraviolet Flame Detectors Manual*.
- [30] Honeywell, *Módulo de Relé Serie 7800*. Kansas, 1999.
- [31] Honeywell, *R4140G Flame Safeguard Programming Controls, Manual*. Golden Valley, 1996.
- [32] Siemens, *SITRANS P220 Manual* , 2012.
- [33] Antonio Creus Sole, *Instrumentación Industrial*, Alfaomega, Ed. Barcelona, España: Marcombo , 1997, vol. Sexta edición.
- [34] Siemens, *Manual de sistema Simatic S7-1200*. Alemania: Siemens, 2009.
- [35] Patricia Martínez y Marcelo Azuaga, *Termocuplas*, 2008.
- [36] Henan Hanwei Electronics Co., Ltd, "MQ-7 Semiconductor Sensor for Carbon Monoxide, datasheet,".
- [37] Active Robots. Active Robots. [Online].  
<http://www.superrobotica.com/download/s330300/103h546-0440.pdf>
- [38] Microchip, "Datasheet Single/Dual Digital Potenciometer with SPI Interface MCP 41XXX/42XXX," U.S.A, 2003.

- [39] SIEMENS, *practica\_tia\_portal\_1*. NÜRNBERG, ALEMANIA: SIEMENS, 2009.
- [40] SIEMENS, *Step 7 Profesional V11.0 SP2, Manual del Sistema*. Nürnberg : Siemens, 2012.
- [41] SIEMENS, *SIMATIC HMI Paneles de Operador, Basic Panels*. Nürnberg , 12/2010.
- [42] SIEMENS, *Ayuda de Software TIA Portal V11*. Nürnberg, 2012.
- [43] mt\_cap-07.pdf, *Válvulas de Solenoide*.
- [44] [http://www.kalipedia.com/ecologia/tema/poder-calorifico-combustibles.html?x1=20070924klpcnafyq\\_135.Kes&x=20070924klpcnafyq\\_255.Kes](http://www.kalipedia.com/ecologia/tema/poder-calorifico-combustibles.html?x1=20070924klpcnafyq_135.Kes&x=20070924klpcnafyq_255.Kes).
- [45] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, *Análisis Climatológico Decadal (del 1 al 10 de Diciembre de 2013)*. Quito, 2013.
- [46] M.sc. Víctor M. Alfaro. (2008, Apr.) Valfarodocs. [Online].  
[http://www2.eie.ucr.ac.cr/~valfaro/docs/Vma.ucr.identificacion.metodo\\_123c.pdf](http://www2.eie.ucr.ac.cr/~valfaro/docs/Vma.ucr.identificacion.metodo_123c.pdf)
- [47] Ing. Percy Castillo Neira, "Combustión en Altura,".
- [48] Testo. (2010) Testo, Academia Online. [Online].  
<http://www.academiatesto.com.ar/cms/?q=necesidades-de-aire-de-combustion>
- [49] Jordi Peñalba Galán, *Modelado y Simulación de una Caldera Convencional*. Tarragona , España, 2004.
- [50] Ing. Percy Castillo Neira, "Combustión Industrial de Gas Natural".
- [51] FIMACO. Colegio de Ingenieros Especialistas de la Provincia de Santa Fe-Distrito1-Santa Fe - Argentina. [Online]. [http://especialistas.org.ar/cie/?page\\_id=15](http://especialistas.org.ar/cie/?page_id=15)
- [52] Comunidad Europea, *Instrucciones Técnicas Complementarias(ITC-MIE-AP01)*., 1982.
- [53] UDELAR – FACULTAD DE INGENIERÍA , "CLASIFICACION DE CALDERAS,".
- [54] ISO 13702:1999, "NORMAS UNE,".
- [55] Petroecuador, *Folleto características técnicas de los hidrocarburos*.
- [56] Jaime Piedra Ramírez, "Plantas de vapor IM-0431-EL BHP".
- [57] William Harrison Severns, *La Producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases.*: Reverte.
- [58] SUPERIOR Boiler Works, *Subbmital data for Water Boiler*.

[59] Hanwey Electronics co. Ltda., MQ-7 Gas sensor.

[60] Marcelo Adrián Fuentes. Educar-Argentina. [Online]. <http://www.educar-argentina.com.ar/ENE2011/educ284.htm>



# ANEXOS

## ANEXO 1

**Tema:** Propiedades Combustibles líquidos y gaseosos, Energía liberada en reacciones químicas comunes de combustión.

Combustible	Peso Específico (Kg/dm <sup>3</sup> )	Poder Calórico (KJ/kg)		Combustible	Poder Calórico a 0°C y 760 mmHg	
		Superior	Inferior		Superior (KJ/m <sup>3</sup> )	Inferior (KJ/m <sup>3</sup> )
Combustible N° 6 Fuel Oil	0,973	43970	39780	Gas Natural	-	37271
Combustible N° 5 Fuel Oil	0,958	43970	41460	Gas Licuado	-	92131
Combustible Diesel	0,845	45640	42700	Gas por cañería	-	16751
Kerosene (Parafina)	0,8	46482	43340	Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	54440	52551
Gasolina	0,705 - 0,770	-	43550	Metano (CH <sub>4</sub> )	37270	33501
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	0,795	-	18840	Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	92130	84701
Etanol CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	0,795	-	27430	Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	119760	110550

*Propiedades físicas de combustibles Líquidos y Gaseosos.*

*Fuente: Elton F. Morales Blancas, Tablas poder calorífico de combustibles, Universidad Austral de Chile. 2005.*

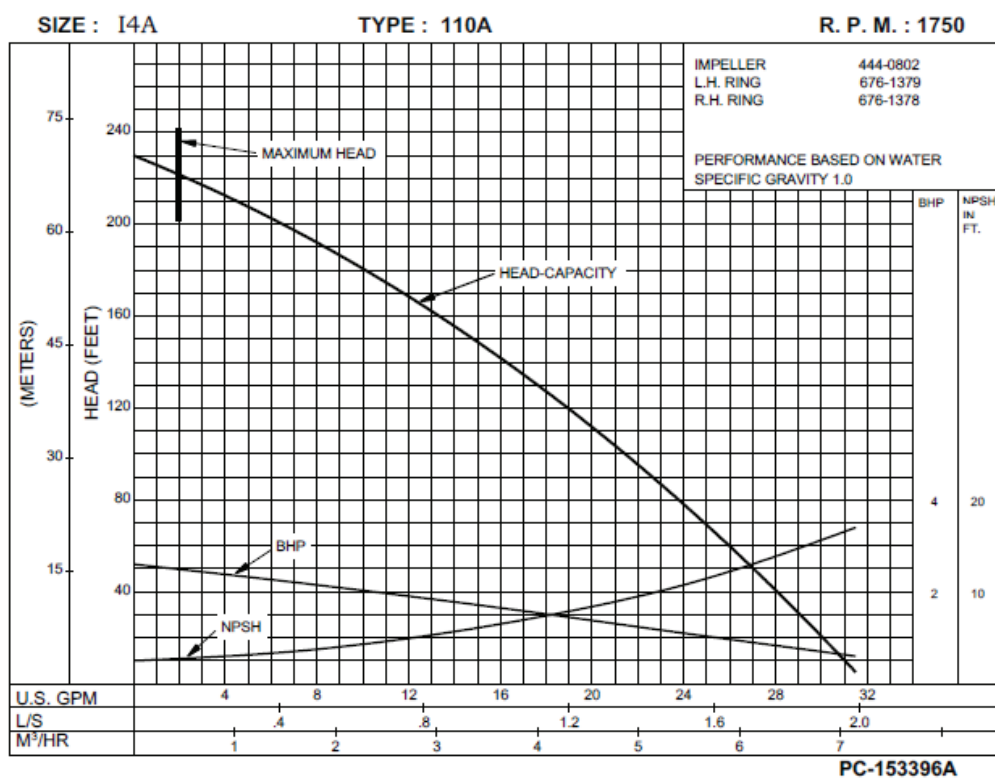
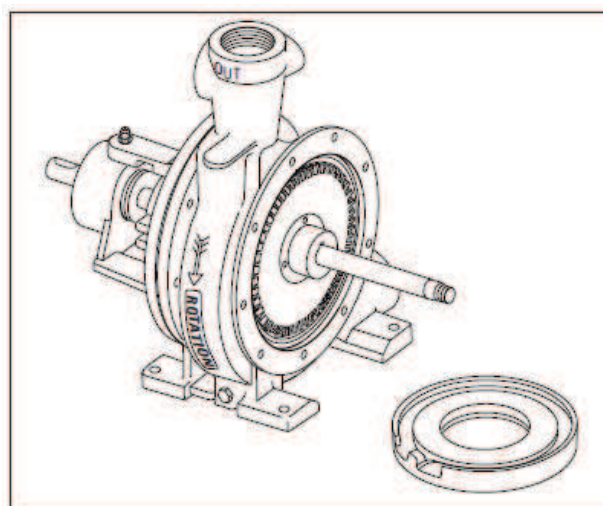
Combustible	Reacción	Calor de combustión (Poder Calorífico Superior)
Carbón a CO	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	2,222 Kcal/kg
Carbón a CO <sub>2</sub>	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	7,833 Kcal/kg
Monóxido de carbono	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	2.414 Kcal/kg
Hidrógeno	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	33.945 Kcal/kg
Azufre a SO <sub>2</sub>	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	2.211 Kcal/kg
Metano	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	13.264 Kcal/kg
Acetileno	$2C_2H_2 + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$	11.945 Kcal/kg
Etileno	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	12.020 Kcal/kg
Etano	$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$	12.403 Kcal/kg
Sulfuro de hidrógeno	$2H_2 + 3O_2 \rightarrow 2SO_2 + 2H_2O$	3.944 Kcal/kg

*Reacciones químicas comunes en la combustión con su energía liberada*

*Fuente: Testo, Optimización de la Combustión, Tiempo Real SA. 2010, pag. 2.*

## ANEXO 2

**Tema:** Capacidad de Bomba Abastecimiento de Agua del Caldero.



*Reacciones químicas comunes en la combustión con su energía liberada*

**Fuente:** Aurora Pumps, Instruction And Repair Manual: Model 114a-115a-116a And 120b Single Stage And Two Stage, Pentair Pumo Group. 2004.

## ANEXO 3

**Tema:** Características Eléctricas actuadores del Caldero.

<b>QUEMADOR</b>	
<i>MARCA:</i>	INDUSTRIAL COMBUSTION
<i>SERIE:</i>	31866 - 1
<i>MODELO:</i>	DL-84P

<b>VENTILADOR (BLOWER)</b>	
<i>MARCA:</i>	MARATHON ELECTRIC
<i>MODELO:</i>	XNE 184 TTDR802 OBC 1
<i>TIPO:</i>	TDR
<i>3 FASES</i>	CLASE B
<i>VOLTAJE:</i>	208 V -230V / 460V
<i>CORRIENTE:</i>	20A -18A / 9A
<i>VELOCIDAD:</i>	3470 RPM
<i>FRECUENCIA:</i>	60 Hz
<i>RENDIMIENTO:</i>	86,50%
<i>FP:</i>	0,911
<i>POTENCIA:</i>	7,5 HP

<b>COMPRESOR</b>	
<i>MODELO:</i>	XVA 56T17 D5316A
<i>POTENCIA:</i>	1 HP
<i>FRECUENCIA:</i>	50 Hz - 60 Hz
<i>VELOCIDAD:</i>	1725 RPM
<i>VOLTAJE:</i>	208V - 230 V / 460V

<b>TRANSFORMADOR IGNICIÓN</b>	
<i>VOLTAJE PRIMARIO</i>	120 VCA
<i>VOLTAJE SECUNDARIO:</i>	6000 VCA
<i>CORRIENTE PRIMARIO:</i>	1,5 A
<i>CORRIENTE SECUNDARIO:</i>	0,020 A
<i>FRECUENCIA:</i>	60 Hz

## ANEXO 4

Los datos técnicos del Controlador y Panel pueden encontrarse en la página web de SIEMENS o descargarse directamente en el enlace:

<http://www.swe.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200%20Manual%20Sistema%20Abr12.pdf>

**Fuente:** Siemens, *SIMATIC S7 Controlador Programable S7-1200 Manual del Sistema*, Nürnberg 2012.

**Tema 1:** Datos Técnicos PLC Siemens S7-100 CPU 1212 AC/DC RLY. (Pág. 754)

**Tema 2:** Datos técnicos Entrada analógica de termopar: Signal Board 1231- 1. (Pág. 839)

**Tema 3:** Datos Técnicos Módulo De Entradas Análogas SM 1231. (Pág. 803)

**Tema 4:** Datos Técnicos Módulo De Salidas Análogas SM 1232. (Pág. 807)

**Tema 5:** Tiempos de respuesta de las entradas analógicas. (Pág. 813)

**Tema 6:** Representación de señales Analógicas. (Pág. 814)

## ANEXO 5

**Tema:** Datos Técnicos Panel Básico KP300 de Siemens


Dirección de descarga:

<https://www.swe.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores/Documents/HMI%20KTPs.pdf>

**Fuente:** Siemens, *SIMATIC HMI Paneles del Operador Basic Panels- Instrucciones de Servicio*, Nürnberg 2010.

## ANEXO 6

Tema: Datos Técnicos Manual de operador Caldero IESS Hospital de Ambato.



**FIRETEST REPORT**

JOB NAME: Ecuador (Ambato) S.O.NO: 63694 DATE: 10/7/91  
 BOILER MODEL: 4-6-751-S150-IC-A2 BURNER MODEL: DL-84P  
 NATIONAL BOARD NO: 11440 SERIAL NO: 31835-1  
 COMBUSTION CONTROL: R4140G 1106 SERIAL NO: 9117 FUEL(S): #2 Oil

Tests Conducted	Gas			No.2 Oil		
	Low	50%	High	Low	50%	High
Fuel Flow - CFH/GPH				10.7		37.1
Firing Rate - MBH						
Heating Value				6.96		6.96
CO 2				10.0		11.5
O 2						
CO or Smoke				0		0
Ambient Temp. °F				65		65
Stack Temp. °F				365		420
Combustion Eff. %*				84.8		84.3
Furnace Pressure				.11		.87
Steam Pressure				70		100
Water Temperature						
Oil Pump Press.						
Supply Oil Press.						
By-Pass Oil Press.				15		15
Atom. Air Pressure				13		29
Gas Press.(Reg.Inlet)						
Gas Press.(Manifold)						
Flame Signal - Main				6.5		6.5
Flame Signal - Pilot				6.0		

Control Checks	Operative	Set Point
Low Water Cutoff	OK	
Aux.Low Water Cutoff	OK	
Operating Limit	OK	100
High Limit	OK	100
Modulating Control	OK	75
Comb. Air Switch	OK	
Oil Pressure Switch		
Oil Temp. Switch		
Atom. Air Switch	OK	
Low Gas Switch		
High Gas Switch		
Burner Door Switch	OK	
Low Fire Hold		
Feedwater Valve		

Alarms	Operative
Low Water	OK
Flame Failure	OK
Hi-Water	

Electric Motors	Voltage	Amperage			Rating
Blower	230-60-3 <sup>Ø</sup>	18.0	17.0	18.0	22.0
Air Compressor					
Metering Pump					
Air-Oil Pump	230-60-3 <sup>Ø</sup>	2.9	3.1	3.1	3.6
Fuel Pump	230-60-3 <sup>Ø</sup>	1.6	1.4	1.4	1.6

Piping Checks	Leaks
Gas	
Oil	OK

Tests By: Bill Meacham  
 Checked By: AAD

Fuente: Superior, Manual de Caldero Scotch Marine Boilers, Hutchinson, Kansas 1989.

## ANEXO 7

Tema: Datos Técnicos Manual de operador Caldero IESS Hospital de Ambato.

## TIPO K

(IPTS 1968)

° C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	° C
<i>Milivoltios</i>												
— 270	— 6,458											— 270
— 260	— 6,441	— 6,444	— 6,446	— 6,448	— 6,450	— 6,452	— 6,453	— 6,455	— 6,456	— 6,457	— 6,458	— 260
— 250	— 6,404	— 6,408	— 6,413	— 6,417	— 6,421	— 6,425	— 6,429	— 6,432	— 6,435	— 6,438	— 6,441	— 250
— 240	— 6,344	— 6,351	— 6,358	— 6,364	— 6,371	— 6,377	— 6,382	— 6,388	— 6,394	— 6,399	— 6,404	— 240
— 230	— 6,262	— 6,271	— 6,280	— 6,289	— 6,297	— 6,306	— 6,314	— 6,322	— 6,329	— 6,337	— 6,344	— 230
— 220	— 6,158	— 6,170	— 6,181	— 6,192	— 6,202	— 6,213	— 6,223	— 6,233	— 6,243	— 6,253	— 6,262	— 220
— 210	— 6,035	— 6,048	— 6,061	— 6,074	— 6,087	— 6,099	— 6,111	— 6,123	— 6,135	— 6,147	— 6,158	— 210
— 200	— 5,891	— 5,907	— 5,922	— 5,936	— 5,951	— 5,965	— 5,980	— 5,994	— 6,007	— 6,021	— 6,035	— 200
— 190	— 5,730	— 5,747	— 5,763	— 5,780	— 5,796	— 5,813	— 5,829	— 5,845	— 5,860	— 5,876	— 5,891	— 190
— 180	— 5,550	— 5,569	— 5,587	— 5,606	— 5,624	— 5,642	— 5,660	— 5,678	— 5,695	— 5,712	— 5,730	— 180
— 170	— 5,354	— 5,374	— 5,394	— 5,414	— 5,434	— 5,454	— 5,474	— 5,493	— 5,512	— 5,531	— 5,550	— 170
— 160	— 5,141	— 5,163	— 5,185	— 5,207	— 5,228	— 5,249	— 5,271	— 5,292	— 5,313	— 5,333	— 5,354	— 160
— 150	— 4,912	— 4,936	— 4,959	— 4,983	— 5,006	— 5,029	— 5,051	— 5,074	— 5,097	— 5,119	— 5,141	— 150
— 140	— 4,689	— 4,694	— 4,719	— 4,743	— 4,768	— 4,792	— 4,817	— 4,841	— 4,865	— 4,889	— 4,912	— 140
— 130	— 4,410	— 4,437	— 4,463	— 4,489	— 4,515	— 4,541	— 4,567	— 4,593	— 4,618	— 4,644	— 4,669	— 130
— 120	— 4,138	— 4,166	— 4,193	— 4,221	— 4,248	— 4,276	— 4,303	— 4,330	— 4,357	— 4,384	— 4,410	— 120
— 110	— 3,852	— 3,881	— 3,910	— 3,939	— 3,968	— 3,997	— 4,025	— 4,053	— 4,082	— 4,110	— 4,138	— 110
— 100	— 3,553	— 3,584	— 3,614	— 3,644	— 3,674	— 3,704	— 3,734	— 3,764	— 3,793	— 3,823	— 3,852	— 100
— 90	— 3,242	— 3,274	— 3,305	— 3,337	— 3,368	— 3,399	— 3,430	— 3,461	— 3,492	— 3,523	— 3,553	— 90
— 80	— 2,920	— 2,953	— 2,985	— 3,018	— 3,050	— 3,082	— 3,115	— 3,147	— 3,179	— 3,211	— 3,242	— 80
— 70	— 2,588	— 2,620	— 2,654	— 2,687	— 2,721	— 2,754	— 2,788	— 2,821	— 2,854	— 2,887	— 2,920	— 70
— 60	— 2,243	— 2,277	— 2,312	— 2,347	— 2,381	— 2,416	— 2,450	— 2,484	— 2,518	— 2,552	— 2,586	— 60
— 50	— 1,889	— 1,925	— 1,961	— 1,996	— 2,032	— 2,067	— 2,102	— 2,137	— 2,173	— 2,208	— 2,243	— 50
— 40	— 1,527	— 1,563	— 1,600	— 1,636	— 1,673	— 1,709	— 1,745	— 1,781	— 1,817	— 1,853	— 1,889	— 40
— 30	— 1,156	— 1,193	— 1,231	— 1,268	— 1,305	— 1,342	— 1,379	— 1,416	— 1,453	— 1,490	— 1,527	— 30
— 20	— 0,777	— 0,816	— 0,854	— 0,892	— 0,930	— 0,968	— 1,005	— 1,043	— 1,081	— 1,118	— 1,156	— 20
— 10	— 0,392	— 0,431	— 0,469	— 0,508	— 0,547	— 0,585	— 0,624	— 0,662	— 0,701	— 0,739	— 0,777	— 10
0	0,000	— 0,039	— 0,079	— 0,118	— 0,157	— 0,197	— 0,236	— 0,275	— 0,314	— 0,353	— 0,392	0
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397	0
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,717	0,758	0,798	10
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162	1,203	20
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570	1,611	30
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981	2,022	40
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394	2,436	50
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,726	2,767	2,809	2,850	60
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224	3,266	70
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,557	3,598	3,639	3,681	80
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054	4,095	90
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467	4,508	100
110	4,508	4,549	4,590	4,632	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878	4,919	110
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287	5,327	120
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,652	5,693	5,733	130
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097	6,137	140
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499	6,539	150
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899	6,939	160
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299	7,338	170
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697	7,737	180
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097	8,137	190
200	8,137	8,177	8,216	8,256	8,296	8,336	8,376	8,416	8,456	8,497	8,537	200
210	8,537	8,577	8,617	8,657	8,697	8,737	8,777	8,817	8,857	8,898	8,938	210
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,220	9,260	9,300	9,341	220
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,502	9,543	9,583	9,624	9,664	9,705	9,745	230
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,070	10,111	10,151	240
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519	10,560	250
260	10,560	10,600	10,641	10,682	10,723	10,764	10,805	10,846	10,887	10,928	10,969	260
270	10,969	11,010	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339	11,381	270
280	11,381	11,422	11,463	11,504	11,546	11,587	11,628	11,669	11,711	11,752	11,793	280
290	11,793	11,835	11,876	11,918	11,959	12,000	12,042	12,083	12,125	12,166	12,207	290
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581	12,623	300
310	12,623	12,664	12,706	12,747	12,789	12,831	12,872	12,914	12,955	12,997	13,039	310
320	13,039	13,080	13,122	13,164	13,205	13,247	13,289	13,331	13,372	13,414	13,456	320
330	13,456	13,497	13,539	13,581	13,623	13,665	13,706	13,748	13,790	13,832	13,874	330
340	13,874	13,915	13,957	13,999	14,041	14,083	14,125	14,167	14,208	14,250	14,292	340
350	14,292	14,334	14,376	14,418	14,460	14,502	14,544	14,586	14,628	14,670	14,712	350
360	14,712	14,754	14,796	14,838	14,880	14,922	14,964	15,006	15,048	15,090	15,132	360
370	15,132	15,174	15,216	15,258	15,300	15,342	15,384	15,426	15,468	15,510	15,552	370
380	15,552	15,594	15,636	15,678	15,720	15,763	15,805	15,847	15,889	15,931	15,974	380
390	15,974	16,016	16,058	16,100	16,142	16,184	16,227	16,269	16,311	16,353	16,395	390
400	16,395	16,438	16,480	16,522	16,564	16,607	16,649	16,691	16,733	16,776	16,818	400
410	16,818	16,860	16,902	16,945	16,987	17,029	17,072	17,114	17,156	17,199	17,241	410
420	17,241	17,283	17,326	17,368	17,410	17,453	17,495	17,537	17,580	17,622	17,664	420
430	17,664	17,707	17,749	17,792	17,834	17,876	17,919	17,961	18,004	18,046	18,088	430
440	18,088	18,131	18,173	18,216	18,258	18,301	18,343	18,385	18,428	18,470	18,513	440

450	18,513	18,555	18,598	18,640	18,683	18,725	18,768	18,810	18,853	18,895	18,938	450
460	18,938	18,980	19,023	19,065	19,108	19,150	19,193	19,235	19,278	19,320	19,363	460
470	19,363	19,405	19,448	19,490	19,533	19,576	19,618	19,661	19,703	19,746	19,788	470
480	19,788	19,831	19,873	19,916	19,959	20,001	20,044	20,086	20,129	20,172	20,214	480
490	20,214	20,257	20,299	20,342	20,385	20,427	20,470	20,512	20,555	20,598	20,640	490
500	20,640	20,683	20,725	20,768	20,811	20,853	20,896	20,938	20,981	21,024	21,066	500
510	21,066	21,109	21,152	21,194	21,237	21,280	21,322	21,365	21,407	21,450	21,493	510
520	21,493	21,535	21,578	21,621	21,663	21,706	21,749	21,791	21,834	21,876	21,919	520
530	21,919	21,962	22,004	22,047	22,090	22,132	22,175	22,218	22,260	22,303	22,346	530
540	22,346	22,388	22,431	22,473	22,516	22,559	22,601	22,644	22,687	22,729	22,772	540
550	22,772	22,815	22,857	22,900	22,942	22,985	23,028	23,070	23,113	23,156	23,198	550
560	23,198	23,241	23,284	23,326	23,369	23,411	23,454	23,497	23,539	23,582	23,624	560
570	23,624	23,667	23,710	23,752	23,795	23,837	23,880	23,923	23,965	24,008	24,050	570
580	24,050	24,093	24,136	24,178	24,221	24,263	24,306	24,348	24,391	24,434	24,476	580
590	24,476	24,519	24,561	24,604	24,646	24,689	24,731	24,774	24,817	24,859	24,902	590
600	24,902	24,944	24,987	25,029	25,072	25,114	25,157	25,199	25,242	25,284	25,327	600
610	25,327	25,369	25,412	25,454	25,497	25,539	25,582	25,624	25,666	25,709	25,751	610
620	25,751	25,794	25,836	25,879	25,921	25,964	26,006	26,048	26,091	26,133	26,176	620
630	26,176	26,218	26,260	26,303	26,345	26,387	26,430	26,472	26,515	26,557	26,599	630
640	26,599	26,642	26,684	26,726	26,769	26,811	26,853	26,896	26,938	26,980	27,022	640
650	27,022	27,065	27,107	27,149	27,192	27,234	27,276	27,318	27,361	27,403	27,445	650
660	27,445	27,487	27,529	27,572	27,614	27,656	27,699	27,740	27,783	27,825	27,867	660
670	27,867	27,909	27,951	27,993	28,035	28,078	28,120	28,162	28,204	28,246	28,288	670
680	28,288	28,330	28,372	28,414	28,456	28,498	28,540	28,583	28,625	28,667	28,709	680
690	28,709	28,751	28,793	28,835	28,877	28,919	28,961	29,002	29,044	29,086	29,128	690
700	29,128	29,170	29,212	29,254	29,296	29,338	29,380	29,422	29,464	29,506	29,547	700
710	29,547	29,589	29,631	29,673	29,715	29,756	29,798	29,840	29,882	29,924	29,965	710
720	29,965	30,007	30,049	30,091	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341	30,383	720
730	30,383	30,424	30,466	30,508	30,549	30,591	30,632	30,674	30,716	30,757	30,799	730
740	30,799	30,840	30,882	30,924	30,965	31,007	31,048	31,090	31,131	31,173	31,214	740
750	31,214	31,256	31,297	31,339	31,380	31,422	31,463	31,504	31,546	31,587	31,629	750
760	31,629	31,670	31,712	31,753	31,794	31,836	31,877	31,918	31,960	32,001	32,042	760
770	32,042	32,084	32,125	32,166	32,207	32,249	32,290	32,331	32,372	32,414	32,455	770
780	32,455	32,496	32,537	32,578	32,619	32,661	32,702	32,743	32,784	32,825	32,866	780
790	32,866	32,907	32,948	32,990	33,031	33,072	33,113	33,154	33,195	33,236	33,277	790
800	33,277	33,318	33,359	33,400	33,441	33,482	33,523	33,564	33,604	33,645	33,686	800
810	33,686	33,727	33,768	33,809	33,850	33,891	33,931	33,972	34,013	34,054	34,095	810
820	34,095	34,136	34,176	34,217	34,258	34,299	34,339	34,380	34,421	34,461	34,502	820
830	34,502	34,543	34,583	34,624	34,665	34,705	34,746	34,787	34,827	34,868	34,909	830
840	34,909	34,949	34,990	35,030	35,071	35,111	35,152	35,192	35,233	35,273	35,314	840
850	35,314	35,354	35,395	35,435	35,476	35,516	35,557	35,597	35,637	35,678	35,718	850
860	35,718	35,758	35,799	35,839	35,880	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081	36,121	860
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,483	36,524	870
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,684	36,724	36,764	36,804	36,844	36,885	36,925	880
890	36,925	36,965	37,005	37,045	37,085	37,125	37,165	37,205	37,245	37,285	37,325	890
900	37,325	37,365	37,405	37,445	37,484	37,524	37,564	37,604	37,644	37,684	37,724	900
910	37,724	37,764	37,803	37,843	37,883	37,923	37,963	38,002	38,042	38,082	38,122	910
920	38,122	38,162	38,201	38,241	38,281	38,320	38,360	38,400	38,439	38,479	38,519	920
930	38,519	38,558	38,598	38,638	38,677	38,717	38,756	38,796	38,836	38,875	38,915	930
940	38,915	38,954	38,994	39,033	39,073	39,112	39,152	39,191	39,231	39,270	39,310	940
950	39,310	39,349	39,388	39,428	39,467	39,507	39,546	39,585	39,625	39,664	39,703	950
960	39,703	39,743	39,782	39,821	39,861	39,900	39,939	39,979	40,018	40,057	40,096	960
970	40,096	40,136	40,175	40,214	40,253	40,292	40,332	40,371	40,410	40,449	40,488	970
980	40,488	40,527	40,566	40,605	40,645	40,684	40,723	40,762	40,801	40,840	40,879	980
990	40,879	40,918	40,957	40,996	41,035	41,074	41,113	41,152	41,191	41,230	41,269	990
1.000	41,269	41,308	41,347	41,385	41,424	41,463	41,502	41,541	41,580	41,619	41,657	1.000
1.010	41,657	41,696	41,735	41,774	41,813	41,851	41,890	41,929	41,968	42,006	42,045	1.010
1.020	42,045	42,084	42,123	42,161	42,200	42,239	42,277	42,316	42,355	42,393	42,432	1.020
1.030	42,432	42,470	42,509	42,548	42,586	42,625	42,663	42,702	42,740	42,779	42,817	1.030
1.040	42,817	42,856	42,894	42,933	42,971	43,010	43,048	43,087	43,125	43,164	43,202	1.040
1.050	43,202	43,240	43,279	43,317	43,356	43,394	43,432	43,471	43,509	43,547	43,585	1.050
1.060	43,585	43,624	43,662	43,700	43,739	43,777	43,815	43,853	43,891	43,930	43,968	1.060
1.070	43,968	44,006	44,044	44,082	44,121	44,159	44,197	44,235	44,273	44,311	44,349	1.070
1.080	44,349	44,387	44,425	44,463	44,501	44,539	44,577	44,615	44,653	44,691	44,729	1.080
1.090	44,729	44,767	44,805	44,843	44,881	44,919	44,957	44,995	45,033	45,070	45,108	1.090

Fuente: Instrumentación Industrial, Dr. Ingeniero industrial Antonio Creus Solé 6ta edición, alfaomega marcombo, 1997.



## ANEXO 8

**Tema:** Propiedades y Composición Diesel N°2.

<b>FÓRMULA QUÍMICA</b>	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> a C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
<b>PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS</b>	
Estado Físico:	Líquido a temperatura a Ambiente
Aspecto:	Aceitoso
Color:	Amarillo
Olor:	Característico
<b>RIESGO DE FUEGO Y EXPLOSIÓN</b>	
Punto de Inflamación:	60 °C
Temperatura de Autoignición:	240 °C
Límite Superior de Inflamabilidad:	5%
Límite Inferior de Inflamabilidad:	0,7 %
Medios de extinción Recomendados:	Espuma, polvo químico seco, CO <sub>2</sub> , Agua pulverizada o nebulizada.
NFPA:	Salud 1; Inflamabilidad 1; Reactividad 0

**Fuente:** Petrocomercial, Ing. D. Vivanco, Ing. Marina García (Revisión), Unidad de Protección Ambiental y Seguridad Industrial, Marzo 2007.

**Composición Diesel N°2**

Agua y Sedimentos	%	-	1,1	INEN 1494
Índice de Cetano Calculado	-	40	-	INEN 1495
Contenido de Carbono	%	-	86	INEN 1491
Contenido de Nitrógeno	%	-	1	INEN 1491
Contenido de Hidrógeno	%	-	12,2	INEN 1492
Viscosidad Cinemática 38°C	cSt	1,3	3,00	INEN 810
Contenido de Azufre	%	-	1,8	INEN 1049
Calor de Combustión	BTU	-	138500	ESTIMADO
Densidad	Lb/Gal	-	7,33	ESTIMADO

**Fuente:** Tesis EPN, Ligna Daniel, Sigüencia Neycer, Estudio de Factibilidad y rediseño del sistema de combustión para el sistema generador de vapor de la empresa "INTERQUIMEC AKZONOBEL", Julio 2011.

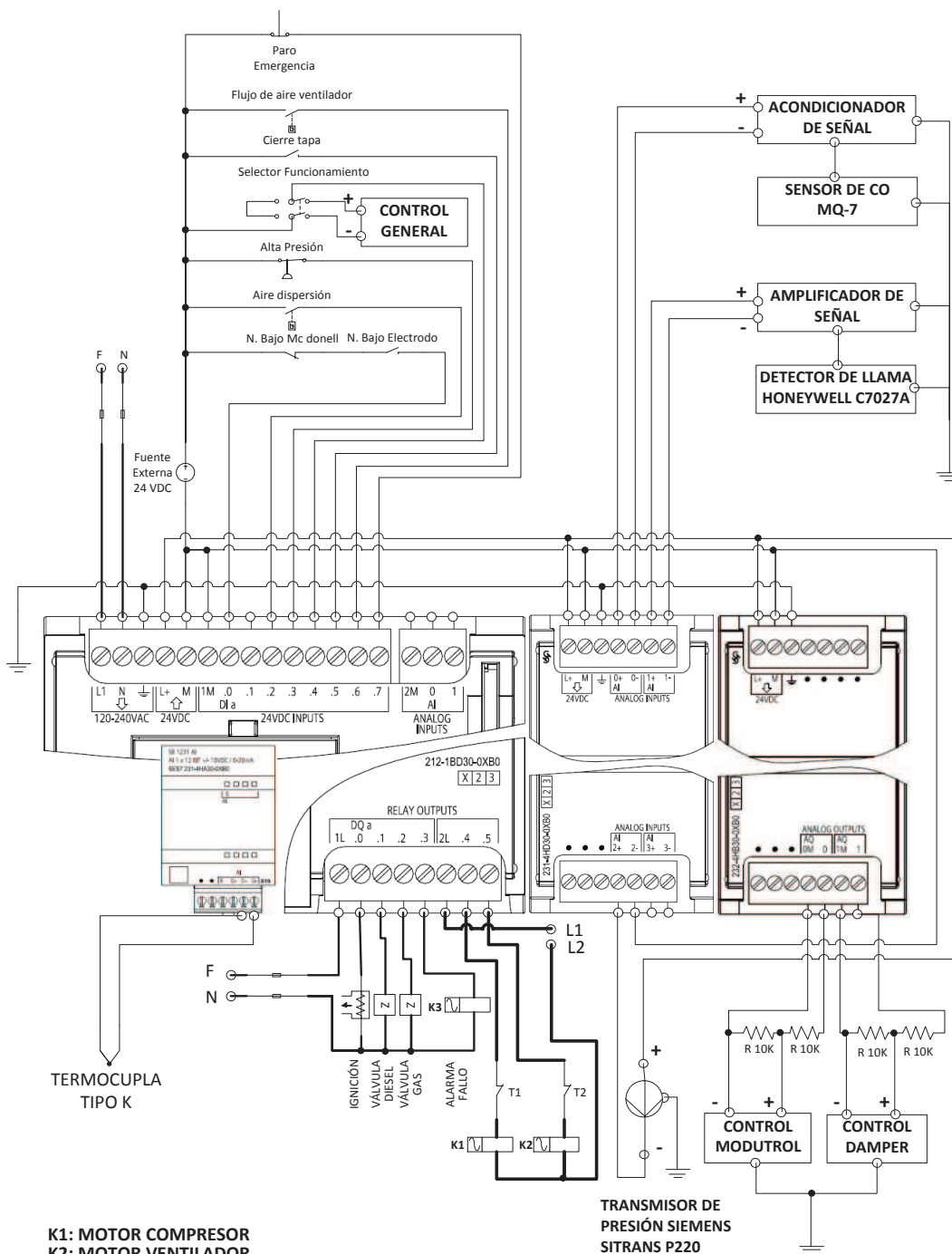
## ANEXO 9

**Tema:** Propiedades de mezclas de aire seco y vapor de agua saturado, a la presión atmosférica (101.3 kPa).

TEMP. °C	Volumen Específico m <sup>3</sup> /kg	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Contenido de Humedad		Entalpia (cont. de calor) kcal/kg		
			g/kg	granos/lb	aire seco (sensible)	humedad (latente)	Total
-10	0.7472	1.3383	0.726	11.19	1.8778	0.9613	2.8391
-9	0.7501	1.3392	0.793	12.24	2.1179	1.0612	3.1691
-8	0.7515	1.3307	0.841	12.98	2.3680	1.1467	3.5047
-7	0.7561	1.3226	0.945	14.58	2.6980	1.2522	3.9502
-6	0.7595	1.3167	1.026	15.83	2.8391	1.3629	4.2014
-5	0.7628	1.3110	1.124	17.38	3.0835	1.4835	4.5670
-4	0.7655	1.3062	1.224	18.89	3.3235	1.6124	4.9369
-3	0.7690	1.3004	1.333	20.57	3.5635	1.7596	5.3192
-2	0.7720	1.2963	1.460	22.38	3.8035	1.9102	5.7137
-1	0.7751	1.2902	1.577	24.34	4.0447	2.0757	6.1204
0	0.7785	1.2845	1.716	26.48	4.2882	2.2567	6.5449
1	0.7812	1.2801	1.845	28.47	4.5292	2.4246	6.9538
2	0.7845	1.2745	1.983	30.60	4.7692	2.4879	7.2571
3	0.7880	1.2690	2.13	32.87	5.0148	2.7890	7.8038
4	0.7913	1.2637	2.387	35.29	5.2548	2.9957	8.2505
5	0.7947	1.2583	2.454	37.87	5.4948	3.2113	8.7061
6	0.7981	1.253	2.632	40.62	5.7404	3.4402	9.1806
7	0.8014	1.2478	2.823	43.56	5.9804	3.6832	9.6638
8	0.8048	1.2425	3.024	46.67	6.2204	3.9436	10.1640
9	0.8082	1.2373	3.239	49.96	6.4615	4.2203	10.6818
10	0.8116	1.2321	3.467	53.50	6.7060	4.5114	11.2174
11	0.8154	1.2264	3.708	57.22	6.9460	5.1414	12.0874
12	0.8189	1.2212	3.967	61.22	7.1860	5.1881	12.3441
13	0.8250	1.2121	4.237	65.38	7.3983	5.5369	12.9342
14	0.8263	1.2102	4.529	69.89	7.6716	5.8715	13.5431
15	0.8303	1.2044	4.835	74.61	7.9115	6.2671	14.1787
16	0.8335	1.1995	5.151	79.64	8.1183	6.7204	14.8387
17	0.8375	1.1939	5.408	83.48	8.3972	7.1260	15.5232
18	0.8415	1.1882	5.673	90.63	8.6372	7.5961	16.2333
19	0.8458	1.1823	5.260	95.60	8.8772	8.0917	16.9689
20	0.8495	1.1770	5.672	102.96	9.1228	8.6117	17.7345
21	0.8541	1.1709	7.109	109.71	9.3628	9.1662	18.5290
22	0.8583	1.1651	7.438	114.78	9.6028	9.7507	19.3535
23	0.8625	1.1594	8.055	124.30	9.8464	10.3651	20.2135
24	0.8670	1.1534	8.373	132.30	10.0705	11.0385	21.1091
25	0.8715	1.1474	9.117	140.69	10.3284	11.7118	22.0403
26	0.8765	1.1409	9.696	149.63	10.5740	12.4453	23.0193
27	0.8811	1.1349	10.306	159.04	10.7640	13.2698	24.0388
28	0.8858	1.1289	10.949	168.96	11.0540	14.0320	25.0860
29	0.8908	1.1226	11.632	179.80	11.2986	14.8887	26.1883
30	0.8958	1.1163	12.351	190.60	11.5396	15.7955	27.3351
31	0.9014	1.1094	13.114	202.38	11.7796	16.7589	28.5385
32	0.9071	1.1024	13.919	214.80	12.0262	17.7657	29.7919
33	0.9127	1.0957	14.768	227.90	12.2662	18.8346	31.0998
34	0.9183	1.0890	15.662	241.70	12.5052	19.9691	32.4643
35	0.9239	1.0824	16.611	256.34	12.7564	21.1402	33.8966
36	0.9302	1.0750	17.613	271.80	12.9908	22.3981	35.3889
37	0.9364	1.0679	18.669	288.10	13.2308	23.7216	36.9524
38	0.9429	1.0605	19.783	305.29	13.4764	25.1165	38.5925
39	0.9495	1.0531	20.961	323.47	13.7184	26.5828	40.2992
40	0.9570	1.0449	22.204	342.65	13.9620	28.1351	42.0971
41	0.9645	1.0370	23.524	363.02	14.2020	29.7730	43.9790
42	0.9715	1.0293	24.912	384.44	14.4020	31.5032	45.9452
43	0.9802	1.0202	26.381	407.11	14.6620	33.3311	48.0131
44	0.9872	1.0130	27.845	429.72	14.9275	35.2467	50.1743
45	0.9957	1.0043	29.575	456.40	15.1675	37.2802	52.4478
46	1.0040	0.9960	31.289	482.65	15.4132	39.3670	54.8002
47	1.0131	0.9871	33.122	511.14	15.6532	41.5627	57.3459
48	1.0227	0.9778	35.063	541.08	15.8955	44.0783	59.9738
49	1.0323	0.9687	36.901	569.46	16.1400	46.6840	62.7240

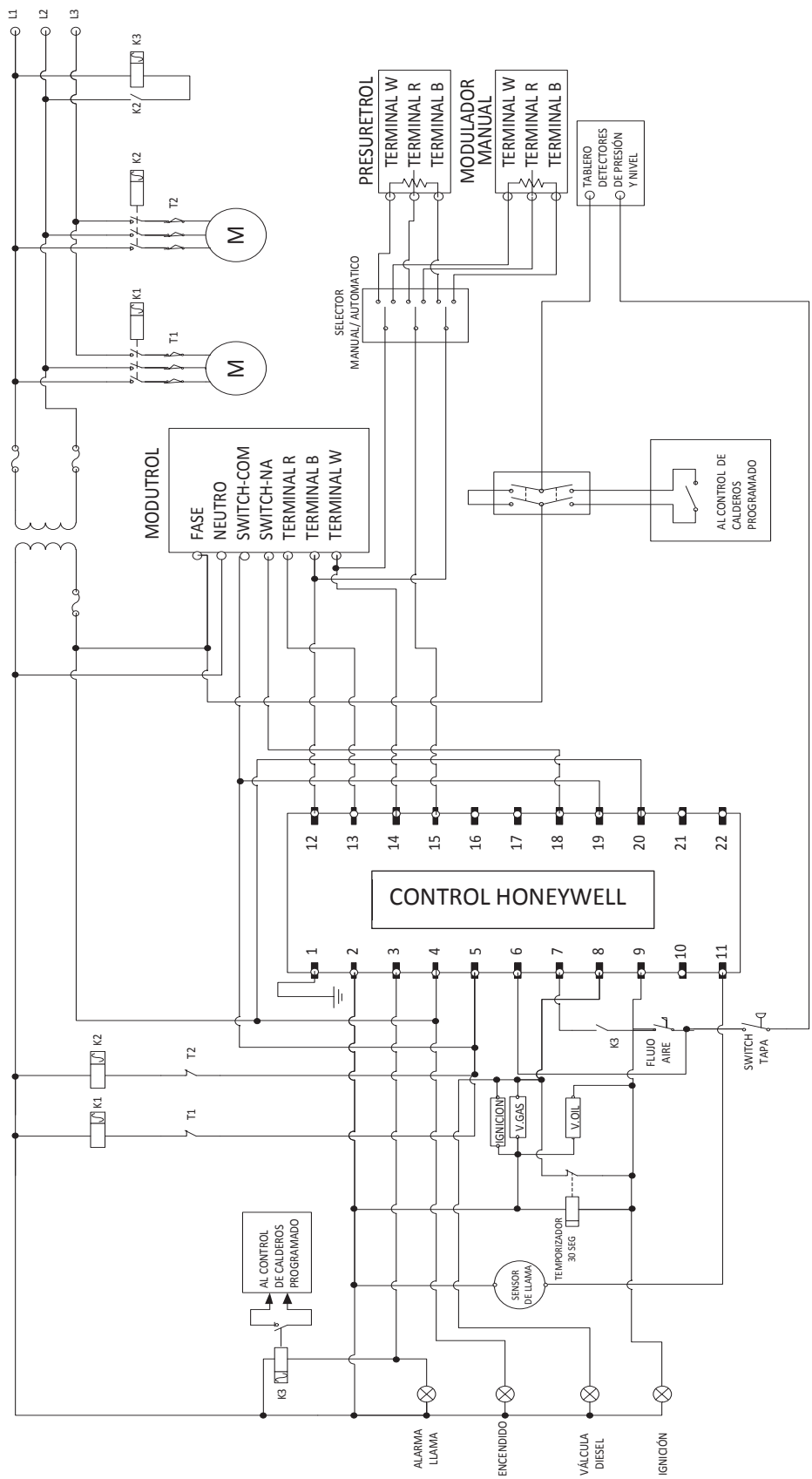
## ANEXO 10

### Tema 1: Diagrama Nuevo Sistema de Control



- K1: MOTOR COMPRESOR
- K2: MOTOR VENTILADOR
- T1: CONTACTO NC RELÉ TÉRMICO DE PROTECCIÓN MOTOR COMPRESOR
- T2: CONTACTO NC RELÉ TÉRMICO DE PROTECCIÓN MOTOR VENTILADOR

### Tema 2: Diagrama Sistema de control Antiguo



## ANEXO 11

### MANUAL DE USUARIO SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN

#### 1. INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

- EL Sistema debe ser manipulado y configurado únicamente por personal debidamente capacitado.
- Antes de realizar una nueva programación asegúrese que el sistema se encuentre desactivado.
- El sistema cuenta con un modo de funcionamiento de prueba, se debe tener sumo cuidado pues en este modo de funcionamiento se ignoran ciertas condiciones de seguridad para probar el funcionamiento.
- Verifique las líneas de gas y combustible, revisar presiones, filtros y asegúrese que las válvulas en dichas líneas estén abiertas.
- Asegúrese que la compuerta de cierre del quemador quede completamente asegurada.
- Revise que los ejes del damper y modutrol se encuentren libres de cualquier objeto que pueda interferir en su movimiento.
- Deshabilite totalmente el sistema desde el subtablero general de calderos antes de cualquier mantenimiento.
- Ante cualquier tipo de trabajo o manipulación del sistema el operador debe contar con el equipo de protección respectivo.

#### 2. CONSTITUCIÓN

El sistema de control de combustión, basa su funcionamiento en un controlador marca SIEMENS S7-1200 CPU 1212C AC/DC RLY, la Figura 1 presenta la distribución de elementos en el tablero de control; la parte mecánica se puede consultar en los manuales originales del caldero.

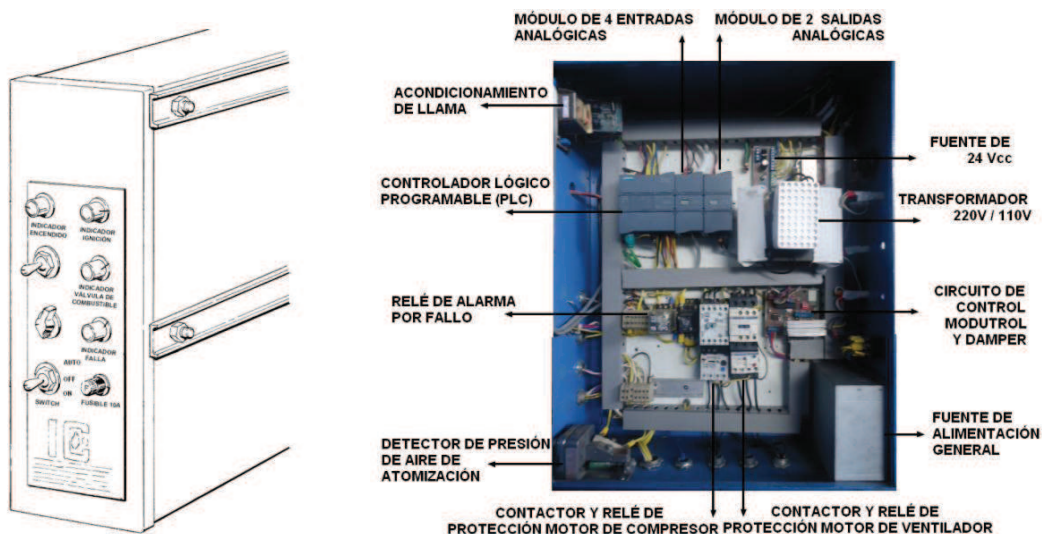


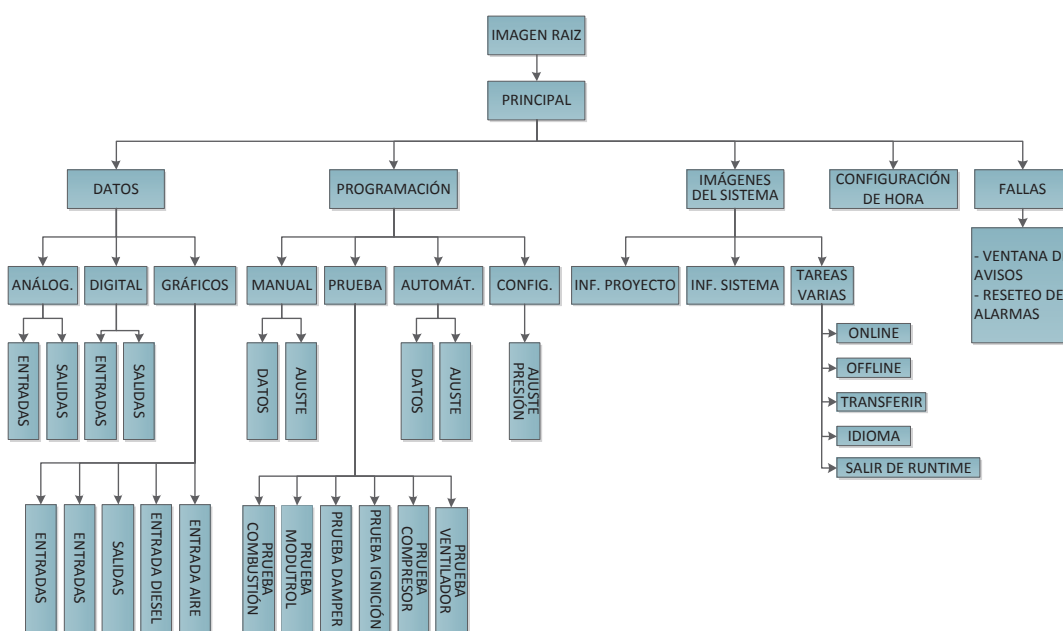
Figura 1 Distribución de elementos Tablero de Control Principal del Caldero

La conexión a los actuadores está claramente numerada en la placa de control y no debe alterarse su conexión. Para la operación del caldero es muy importante la posición del switch de encendido, si se encuentra activo se encenderá el indicador correspondiente (color Blanco-Naranja). En el panel frontal, las luces indicadoras se determinan por el color, así se tiene:

Fuente de Ignición Activada, color Naranja; Válvula de Combustible Abierta, color verde; Alarma por fallo, color rojo.

### 3. MANEJO

Para el manejo del sistema tener en cuenta el diagrama de organización del sistema, mostrado a continuación:



En general las imágenes se presentan con la misma estructura de la imagen principal:

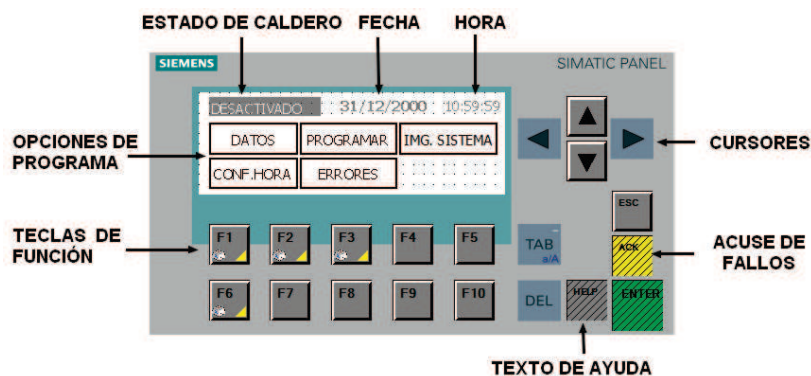


Figura 2 Imagen General del sistema

Se puede observar el estado del caldero, es importante tener en cuenta el botón texto de ayuda; en cada imagen despliega el texto para aclarar cada una de las opciones que se presentan. La tecla ACK, sirve únicamente para acusar los avisos de error, previamente se debe corregir la causa.

#### 4. Funcionamiento:

Para ingresar en los modos de funcionamiento, en la imagen principal se escoge la opción PROGRAMAR. Se despliega la imagen (Figura 3), con tres modos de funcionamiento y la configuración de los límites de presión de trabajo del caldero:

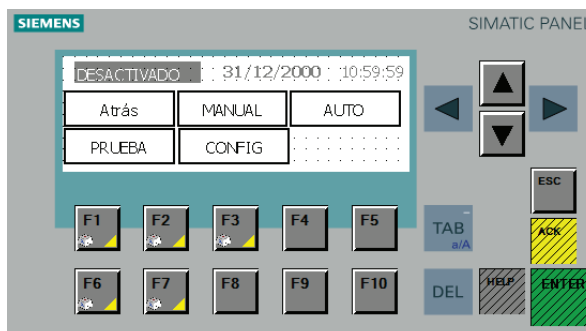


Figura 3 Pantalla de Programación del sistema

##### 4.1 Modo de Prueba

Para iniciar el sistema en modo de pruebas, debe asegurarse que:

- La compuerta del quemador esté cerrada y asegurada.
- La presión de vapor se encuentre dentro de los rangos seguros.
- No exista acumulación de combustible dentro de la cámara de combustión; de ser el caso, se recomienda hacer un barrido de aire por un lapso de 5 a 10 minutos.
- No exista acumulación de material particulado.
- El pulsador paro de emergencia no esté presionado.
- Los cables eléctricos se mantengan conectados correctamente entre el sistema de control, los actuadores y sensores.

Se recomienda en general iniciar con un barrido de aire de 3 minutos, con el fin de remover restos acumulados en el interior del caldero. El funcionamiento en modo de prueba inhibe los límites de seguridad para probar el funcionamiento individual e independiente de los actuadores, por tal motivo debe realizarse con la debida precaución y por personal capacitado para ello. En la imagen de modo de prueba se encuentran los actuadores que se pueden probar individualmente, la opción "P.COMBUSTIÓN" permite iniciar la combustión y asegurarse que todos los actuadores funcionen correctamente. Los actuadores que se pueden probar individualmente son: ventilador, compresor, chispa de ignición, movimiento damper y modutrol. El botón HELP despliega más información.

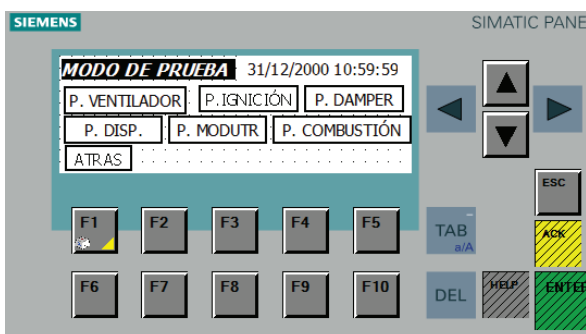


Figura 4 Pantalla Modo de Funcionamiento de prueba.

## 4.2 Modo Manual

En el modo de funcionamiento Manual, el operador debe calibrar manualmente la tasa de combustión, esto es; introducir directamente el porcentaje de apertura de damper y modutrol; aunque se puede hacerlo manualmente en base a la observación de llama, es importante observar la concentración de CO en la opción DATOS (Figura 4), normalmente el rango es: 0 ppm – 5 ppm; además el damper debe tener una apertura máxima del 25% a máxima capacidad del modutrol. La opción AJUST, permite modificar la posición de los actuadores (Damper y Modutrol).

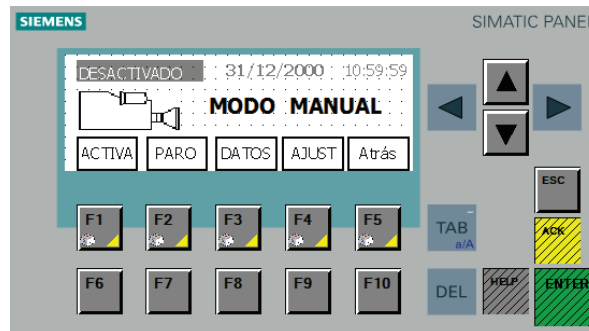


Figura 4. Pantalla modo manual

## 4.3 Modo Automático

Se presentan dos modos de funcionamiento: Modo de control en función de las concentraciones de CO (Modo Automático) y modo de control en función de la presión (Modo Semiautomático) únicamente. Para los dos casos únicamente se debe configurar el SET POINT de presión, normalmente calibrado a la presión límite superior del caldero. Para el caso de las emisiones de CO, el SET POINT está dado por el programa.

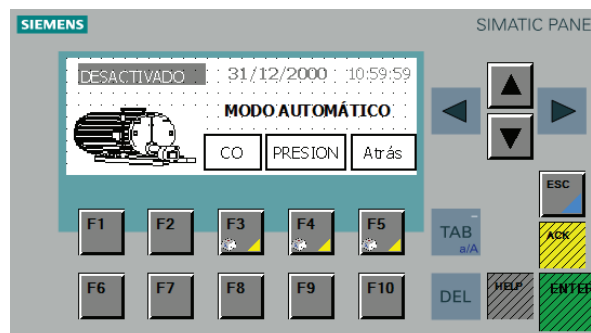


Figura 5. Pantalla Modos de Funcionamiento Automático

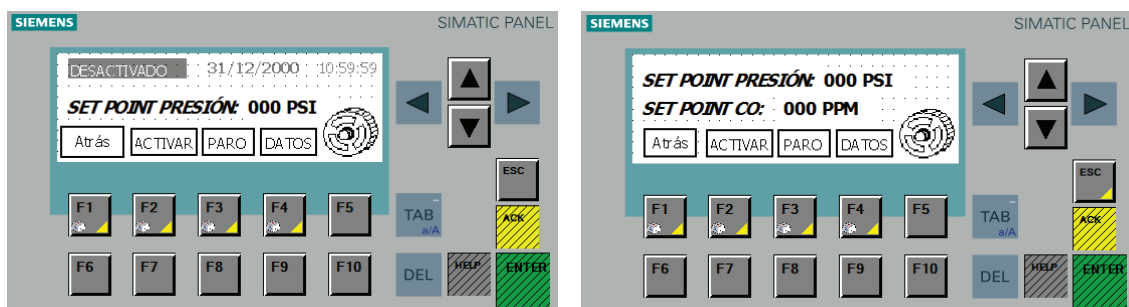


Figura 6 Modo de Funcionamiento Automático y Semiautomático



## 5. FALLOS Y ERRORES

Ante una condición de riesgo, se despliega una señal de alarma en la pantalla y se torna de color amarillo; ante una condición peligrosa el sistema automáticamente se apaga, presenta una señal de error y se torna color rojo; solo se encenderá si se cumplen las condiciones seguras de encendido. En la Figura 7 se observan las pantallas que se despliegan en caso de error; los avisos de advertencia desaparecen automáticamente con la condición de riesgo, los avisos de peligro, en cambio, necesitan ser corregidos y acusados con la tecla ACK. Asegúrese de corregir la condición de riesgo, caso contrario el aviso no podrá acusarse.

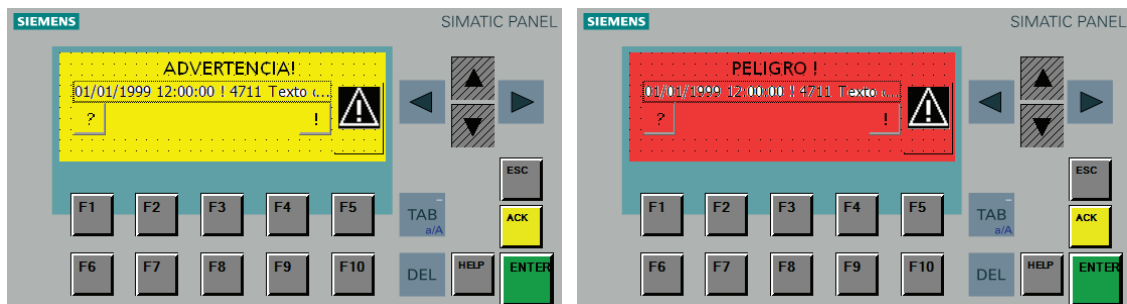


Figura 7 Pantallas de aviso de Error

**Reseteo de Variables Internas.-** Después de acusar los avisos se recomienda resetear las variables internas del PLC, esto se hace desde la pantalla principal, opción errores y RESETEAR. La figura 8 muestra la pantalla:



Figura 8 Reseteo de variables Internas

### **Sugerencias para corrección de errores:**

El PLC ofrece visibilidad de estado de entradas y salidas digitales; es importante identificarlas para hacer seguimiento a errores. La Figura 9 presenta la distribución de entradas y salidas en el dispositivo.

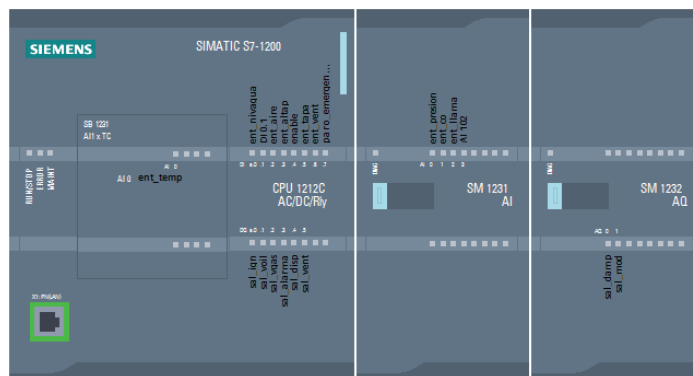


Figura 9 Distribución entradas salidas del PLC



Fallas en el encendido: La etapa más compleja en la operación del caldero es el encendido, se presentan pasos para detectar la causa del fallo:

- Para iniciar la secuencia de encendido, se debe verificar que: el damper y modutrol se encuentren totalmente cerrados, botón paro de emergencia desactivado, switch de control activado, suficiente nivel de agua, compuerta cerrada, fallos acusados.
- Verificar el movimiento del damper debe abrir totalmente para iniciar la pre purga, si se encuentran desperfectos en el movimiento se debe presionar el botón reset en la placa electrónica de control del damper, se verifica también que el modutrol haga un barrido inicial, en esta etapa se activa el ventilador y compresor, es decir únicamente las salidas DQ0.4 y DQ0.5, deben estar activadas, si esta activada DQ0.3, resetear variables internas. La purga inicial dura alrededor de 45 segundos. Tener en cuenta que DQ0.4 y DQ0.5, deben estar encendidas durante todo el funcionamiento del caldero.
- Pasado el periodo anterior, observe que el damper y modutrol se posicionen en apertura mínima (bajo fuego), se enciende la ignición (DQ0.0), dos segundos después se abre la electroválvula de gas (DQ0.2), verificar la formación de llama blanca (si no aparece: revisar conexiones de electroválvula y fuente de ignición, el sensor de llama se verifica en modo de prueba), 4 segundos después de detectarse la llama inicial, se abre la electroválvula de diesel (DQ0.1), verifique que se forme la llama inicial, además durante este proceso el damper y modutrol mantienen sus posiciones, si se forma la llama principal (color amarillo) y luego se apaga, revise los límites: valor de presión, concentración de CO y que el damper no se abra totalmente.
- Durante el funcionamiento, el caldero se apaga por fallos de llama principalmente, revise que el damper se mueva de forma correcta.

Finalmente, se recomienda un mantenimiento periódico, limpieza de válvulas, purgas en el cuerpo del caldero, se puede utilizar como guía el Manual de Mantenimiento que ofrece la empresa FIMACO S.A., cuya referencia bibliográfica es: **FIMACO**. Colegio de Ingenieros Especialistas de la Provincia de Santa Fe-Distrito1-Santa Fe - Argentina. Colegio de Ingenieros Especialistas de la Provincia de Santa Fe-Distrito1-Santa Fe - Argentina. [En línea] FIMACO S.A. [Citado el: 15 de Agosto de 2013.] [http://especialistas.org.ar/cie/?page\\_id=15](http://especialistas.org.ar/cie/?page_id=15).

**ANEXO 12**

**Tema 1:** Análisis de Gases y Materia Particulado del Caldero N°3 del IESS  
Hospital de Ambato (Control Antiguo).

	
<b>ESCUELA POLITECNICA NACIONAL</b>	
<b>CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL (CICAM)</b>	
<b>INFORME DE CARACTERIZACIONES GASEOSAS N° IR13023G</b>	
<b>HOSPITAL DEL IESS (AMBATO)</b>	
<b>CALDERO</b>	
<b>FECHA: 18/03/13</b>	



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: [cicamepn@gmail.com](mailto:cicamepn@gmail.com) Quito – Ecuador



### 1. INFORMACIÓN BÁSICA

#### 1.1. CLIENTE

EMPRESA	Hospital IESS (Ambato)
PERSONA DE CONTACTO	Diana Medina
CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN	Medición-Caldero
DIRECCIÓN	Calle Dr. Rodrigo Pachano 10-76 y Eduardo Martínez Ambato - Tungurahua
TELÉFONO	-----

#### 1.1. EMPRESA RESPONSABLE DEL MONITOREO

EMPRESA	Centro de Investigaciones y Control Ambiental (CICAM); EPN
DIRECCIÓN	Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R", Ladrón de Guevara E 11-253 y Andalucía
TELÉFONO	2507 – 144 ext. 2623, 2221-306
EMAIL	<a href="mailto:cicamepn@gmail.com">cicamepn@gmail.com</a>
SOLICITUD DE TRABAJO °N	

### 2. INTRODUCCIÓN

#### 2.1. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El estudio realizado se hace con el fin de determinar la concentración de gases y material particulado de combustión proveniente de la fuente fija de Caldero MDHAWK 4-6-75 (Superior) ubicado en el Hospital del IESS de Ambato y evaluar el cumplimiento de la legislación ambiental al compararlos con el libro VI anexo III, anexo III A del TULAS (DE/CICAM/16).

#### 2.2. DEFINICIONES

##### 2.2.1 Chimenea

Conducto que facilita el transporte hacia la atmósfera de los productos de combustión generados en la fuente fija.

##### 2.2.2 Combustión

Oxidación rápida, que consiste en una combinación del oxígeno con aquellos materiales o sustancias capaces de oxidarse, dando como resultado la generación de gases, partículas, luz calor.

##### 2.2.3 Condiciones normales

Cero grados centígrados (0 °C) y mil trece milibares de presión (1 013 mbar).

##### 2.2.4 Contaminante del aire

Cualquier sustancia o material emitido a la atmósfera, sea por actividad humana o por procesos naturales, y que afecta adversamente al hombre o al ambiente.



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 2.2.5 Contaminantes comunes del aire

Cualquier contaminante del aire para los cuales se especifica un valor máximo de concentración permitida, a nivel del suelo, en el aire ambiente, para diferentes períodos de tiempo, según la normativa aplicable.

### 2.2.6 Fuente fija de combustión

Es aquella instalación o conjunto de instalaciones, que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, y que emite o puede emitir contaminantes al aire, debido a proceso de combustión, desde un lugar fijo o inamovible.

### 2.2.7 Material particulado

Está constituido por material sólido o líquido en forma de partículas, con excepción del agua no combinada, presente en la atmósfera en condiciones normales.

### 2.2.8 Índice de isocinetismo

Relación entre la velocidad de succión en la boquilla y la velocidad del gas en la chimenea. El margen de error aceptado para validar los resultados del muestreo de Material Particulado (MP) es del  $\pm 10\%$ .

### 2.2.9 Temperatura de combustión

La temperatura de combustión suficientemente elevada es un requisito para una combustión completa. La temperatura a la cual se efectúa la combustión apropiada es principalmente una función de incineración del compuesto orgánico que interesa.

## 2.3 MÉTODO DE MONITOREO

### 2.3.1 PROCEDIMIENTO DE MONITOREO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA

Previo a la ejecución del monitoreo los técnicos planifican aspectos como cuidado de los equipos, ejecución del monitoreo, sujeción de la sonda isocinética, seguridad personal, provisión de energía eléctrica, zonificación del trabajo además de consultar con los operadores alguna indicación que sea de beneficio mutuo.

### 2.3.2 MONITOREO ISOCINÉTICO DE PARTÍCULAS

Primeramente se realiza un estudio de velocidades para determinar la boquilla a ser utilizada en el monitoreo, posteriormente ubicada la boquilla se realiza una prueba de fugas al equipo para evitar datos erróneos en la medición.

Se calculan la cantidad de puntos de muestreo con los datos físicos de la chimenea (Diámetro, neplo del puerto, A, B, etc). Estos datos se determinan de acuerdo al Libro VI Anexo 3 del Tulas (DE/CICAM/16) referido como documento de información.

Se analiza en cada punto y se recolectan datos de presión y temperatura hasta conseguir la recolección de mínimo 0.6 metros cúbicos en base seca, y obteniendo un porcentaje de isocinetismo de entre 90 a 110 %.

### 2.3.3 LEGISLACIÓN APLICABLE

- Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión (TULAS LIBRO VI ANEXO III (DE/CICAM/16), Ordenanza de Quito 213(DE/CICAM/14)).



## ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 2.3. 4 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE GASES

Antes de un monitoreo de gases se debe determinar el número de punto de medición tomando las dimensiones geométricas de la fuente fija y utilizando lo referido en el TULAS LIBRO VI anexo 3 (DE/CICAM/16).

Posteriormente se realiza el siguiente procedimiento:

1. Encender el equipo
2. Esperar que se encere. Esta operación dura alrededor de 60 segundos
3. Se verifica que la fecha y hora sean correctas en la unidad de control-system-change date, se puede ajustar el dato en el caso de que no sea correcto.
4. Para empezar la medición, se debe crear una carpeta en donde se contengan los datos medidos con el equipo. Para esto, se debe ingresar a la opción "Testo Measuring". Con la tecla de selección izquierda se ingresa a la memoria que contiene todas las carpetas y registros de medida del equipo. Para la creación de una nueva carpeta, se siguen los siguientes pasos:
5. En la pantalla seleccionar la opción "change" y luego "New file o new location" dependiendo de si se tienen muchos equipos en una sola empresa o solo uno, respectivamente.
6. Creada la carpeta se procede a la medición de los parámetros. Para esto se siguen los siguientes pasos:
  - Programar al equipo de acuerdo al número de puntos determinados para el equipo a ser monitoreado.
7. Se debe verificar el tipo de combustible a utilizar de la siguiente manera:
  - Presionar la tecla de carpeta y seleccionar "Input", posteriormente fuel.
  - Finalmente seleccionar el combustible de acuerdo al que se utilice en el equipo a ser medido.
8. Posteriormente, ubicar la sonda en el puerto y prender la bomba con la opción "Pump" detallada en la pantalla principal.
9. Presionar opción "star" en la pantalla.
10. Cuando se termine el muestreo, en la pantalla se indicará que las celdas por las que pasa el gas contaminado se están limpiando; aparecerá en la pantalla un dialogo diciendo "refresh air".
11. Terminado este proceso se termina con el muestreo. Los datos se almacenan en la memoria de la unidad de control.
12. Posteriormente, se apaga la bomba con la opción PStop mostrada en la pantalla principal.
13. Realizada la medición, se necesita, en algunos casos, la impresión de los parámetros como un respaldo adicional o para una referencia que necesite el cliente. Para esto existe la opción de imprimir la(s) medición (es), se siguen los siguientes pasos:
  - Seleccionar la carpeta
  - Luego Memory seguido de Read out memory. Seleccionando estas opciones aparecen las mediciones realizadas para un cierto equipo o empresa.
  - Se abre alguno de los archivos y se selecciona la tecla print para imprimir los datos.
14. Además de la medición de gases se realiza una medida de opacidad. Esta medida se la realiza con la bomba de humo así:
  - Se pone el papel filtro en la cavidad de la bomba.
  - Se introduce la punta metálica de la bomba de humo en el puerto.
  - Se succiona 10 veces asegurando que el émbolo recorra toda la cámara.
  - Posteriormente comparar con la escala.
15. De la misma manera con el equipo se realiza la medida de flujo expresada en  $m^3/h$  de la siguiente manera:
  - Presionar la tecla  $v_{on}$ , así el equipo se encera automáticamente y empieza la medición del flujo de gas.
  - Esperar a que la medida se estabilice.
  - Presionar la tecla  $v_{off}$ , para detener la medición del flujo. Las teclas  $v_{on}$  y  $v_{off}$  son una misma y se localizan en el menú del display del equipo.
16. Finalmente los datos obtenidos serán registrados en el formato F-PEE-CICAM-05-04 "RESULTADOS DE EMISIONES GASEOSAS"



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 2.3.5 PARÁMETROS DE MEDICIÓN

Los parámetros medidos fueron:


- Temperatura (°C)
- Porcentaje de O<sub>2</sub> (%)
- Emisión de SO<sub>2</sub> (mg / N m<sup>3</sup>)
- Emisión de NO<sub>2</sub> (mg / N m<sup>3</sup>)
- Emisión de NO (mg / N m<sup>3</sup>)
- Emisión de CO (mg / N m<sup>3</sup>)

### PARÁMETROS CONTROLADOS

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO ANALÍTICO	MÉTODO DE ENSAYO
Flujo de gas seco	m <sup>3</sup> /h	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 2	USEPA MI, M2B
Temperatura	°C		PEE/CICAM/08
Oxígeno	%	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 3	PEE/CICAM/08
Material Particulado	mg/m <sup>3</sup>	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 5, Revisión 1996	PEE/CICAM/10
*Monóxido de Carbono (CO)	ppm	EPA CTM 30 Revisión 1997, EPA CTM 34 Revisión 1999	PEE/CICAM/08
*Monóxido de Nitrógeno (NO)	ppm		PEE/CICAM/08
*Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	ppm		PEE/CICAM/08
*Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	ppm		PEE/CICAM/08

\*Parámetros acreditados por el OAE

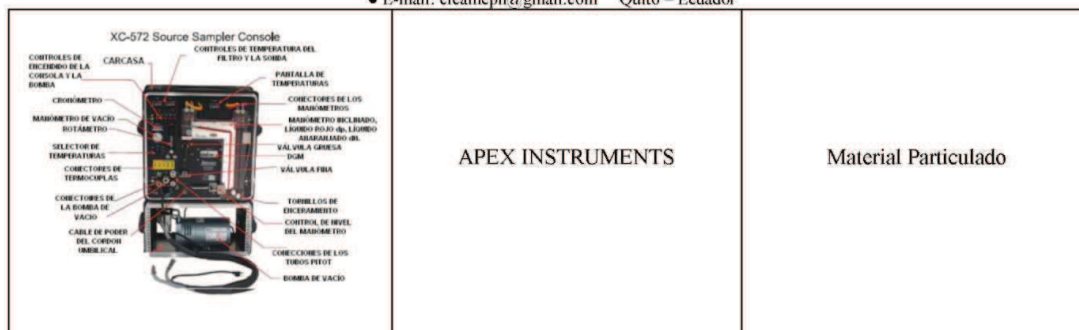
### 2.3.6 EQUIPOS

EQUIPO	MARCA	PARÁMETROS
Equipo medidor de gases 	Testo 350 XL	Temperatura Flujo CO NO NO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub>



## ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E. 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 2.3.7 CÁLCULOS

En el reporte de gases, cada parámetro posee una cierta concentración ver Gráfico 1, pero para el reporte final y para transformarlo a condiciones normales, se aplica las siguientes formulas:

#### Conversión de ppm a mg/m<sup>3</sup> referido al valor de O<sub>2</sub> de referencia

$$\text{CO (mg/m}^3\text{)} \quad \text{CO} = \frac{21 - \text{O}_2 \text{ referencia}}{(21 - \text{O}_2)} \times \text{CO (ppm)} \times 1.25$$

21 : Contenido de oxígeno del aire  
O<sub>2</sub> : Contenido de oxígeno medido

$$\text{NO}_x \text{ (mg/m}^3\text{)} \quad \text{NO}_x = \frac{21 - \text{O}_2 \text{ referencia}}{(21 - \text{O}_2)} \times \text{NO}_x \text{ (ppm)} \times 2.05$$

21 : Contenido de oxígeno del aire  
O<sub>2</sub> : Contenido de oxígeno medido

$$\text{SO}_2 \text{ (mg/m}^3\text{)} \quad \text{SO}_2 = \frac{21 - \text{O}_2 \text{ referencia}}{21 - \text{O}_2} \times \text{SO}_2 \times 2.86$$

*Referencia: Manual del equipo TESTO 350-XL*

### 3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados finales de las emisiones gaseosas medidas y las respectivas normativas.





## ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E.11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### COMPARACION CON LA NORMATIVA

Mediciones a condiciones normales y corregidas a 7% de oxígeno.

Parámetro	MEDICIÓN (mg/Nm <sup>3</sup> )	NORMA 1 (mg/Nm <sup>3</sup> )	NORMA2 (mg/Nm <sup>3</sup> )
*CO	4.54	-----	-----
*SO <sub>2</sub>	294.41	1650	1650
*NO <sub>x</sub>	136.55	700	700
Particulado	92.54	355	355

\*Parámetros acreditados por el OAE

### Normas

1.-Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión. Norma para fuentes en operación antes de Enero del 2003. (mg/Nm<sup>3</sup>); miligramos por metro cúbico de gas a condiciones normales de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, corregidos a 7% de O<sub>2</sub>, en base seca. Establecidos en el TULAS-Libro VI-Anexo 3 –Tabla1 (DE/CICAM/16).

2.-Límites máximos permisibles de emisiones al aire para calderos generadores de vapor. Norma para fuentes en operación antes de Enero del 2003. (mg/Nm<sup>3</sup>); miligramos por metro cúbico de gas a condiciones normales de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, corregidos a 7% de O<sub>2</sub>, en base seca. Establecidos en el TULAS-Libro VI-Anexo 3A –Tabla1(DE/CICAM/16).



## ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricuarte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



Gráfico 1

Control Unit			
Testo t350/t454 CU			
SN: 01802830 /USA			
ESCUELA POLITECNICA			
CICAM			
CONTROL AMBIENTAL			
1			
Settings:			
Data rate:	20	sec	
Prg-Typ:	normal		
from: 03/18/13 15:31:20			
to: 03/18/13 15:33:40			
Number: 0008			
	01	02	03
	mbar	m/s	m <sup>3</sup> /h
01	0.22	3.9	2762.1
02	0.08	2.4	1665.6
03	0.11	2.8	1953.1
04	0.11	2.8	1953.1
05	0.11	2.8	1953.1
06	0.00	0.0	0.0
07	0.06	2.0	1442.5
08	0.18	3.5	2498.5
	04		
	°C		
01	54.9		
02	94.4		
03	108.2		
04	108.2		
05	108.2		
06	120.7		
07	131.9		
08	141.6		
Area	0.20	m <sup>2</sup>	
Temperature	20.0	°C	
Humidity	45.0	%	
Abs. press.	1013.0	mbar	
Density	1292.2	g/m <sup>3</sup>	
Pitot factor	0.67		
Correction factor	1.00		
03/26/13 18:29:23			
CICAM EPN			

Testo t350 XL			
Testo t350 XL			
SN: 01810805 /USA			
ESCUELA POLITECNICA			
CICAM			
CONTROL AMBIENTAL			
gases			
Settings:			
Sample time:	8	min	
Rinse time:	5	min	
Data rate:	60	sec	
Calc. Mean value:	Yes		
Calc. average mean:			
144.1	°C	T1	
9.44	%	O2	
0.57	%	CO2	
3	ppm	CO	
55	ppm	NOX	
85	ppm	SO2	
	ppm	CxHy	
85.6	%	Eff	
82.8	%	EXR	
1.05	1/m	PUMP	
55	ppm	NO	
0.0	ppm	NO2	
	inW	ap	
	m <sup>3</sup> /h	FLOW	
9.8	V	Batt	
	m/s	Vel	
from: 03/18/13 15:18:13			
to: 03/18/13 15:26:36			
Number: 0008			
Diesel			
from: 03/18/13 15:18:13			
to: 03/18/13 15:26:36			
Number: 0008			




### Medidas tomadas

Elaborado por:

NOMBRE Nelson SalazarFIRMA *Nelson Salazar*FECHA 3/04/2013

Revisado por:

NOMBRE Aracely FierroFECHA 3/04/2013

		E.P.N. CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL		RESULTADOS DE EMISIONES GASEOSAS			
CLIENTE	HOSPITAL DEL IESS AMBATO			FECHA DE MUESTREO	18/03/2013		
CONTACTO	Diana Medina Calle Dr. Rodrigo Pachano 10-76 y Eduardo Martínez Ambato - Tungurahua			FECHA DE REALIZACIÓN	18/03/2013		
DIRECCIÓN				CÓDIGO DEL INFORME	IR13023		
POTENCIA	125 BHP			SOLICITUD DE TRABAJO			
TIPO DE FUENTE	Caldero						
AÑO DE INICIO DE OPERACIÓN	1991						
MODELO/SERIE	MDHAWK 4-6-75			TEMPERATURA	20		
CARGA DE TRABAJO	6008 LB/HR			HUMEDAD	45%		
COMBUSTIBLE	Diesel						
MONITOREADO POR	Nelson Salazar						
<b>PARÁMETROS, LÍMITES PERMISIBLES Y METODOS EMPLEADOS</b>							
PARÁMETRO	UNIDAD	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MÉTODO INTERNO	MÉTODO DE REFERENCIA	UNIDAD	Medida corregida al
FLUJO DE GAS SECO	m <sup>3</sup> /h	1953,10	NM	PEE/CICAM/08	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 2	ng / m <sup>3</sup> gscn	7% O <sub>2</sub>
TEMPERATURA	° C	144,10	NM	PEE/CICAM/08		ng / m <sup>3</sup> gscn	4,54
OXIGENO	%	9,44	NM	PEE/CICAM/08	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 3	ng / m <sup>3</sup> gscn	294,41
DIÓXIDO DE CARBONO	%	8,57	NM	PEE/CICAM/08		ng / m <sup>3</sup> gscn	136,55
*MONÓXIDO DE CARBONO	ppm	3,00	NM	PEE/CICAM/08	EPA CTM 30, EPA CTM 34	ng / m <sup>3</sup> gscn	92,54
*DIÓXIDO DE AZUFRE	ppm	85,00	NM	PEE/CICAM/08			39,66
*ÓXIDOS DE NITRÓGENO	ppm	55,00	NM	PEE/CICAM/08			
PARTÍCULAS	g/m <sup>3</sup> gas seco	0,07	NM	PEE/CICAM/05	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 5,		
EXCESO DE AIRE	%	82,80	NM	PEE/CICAM/08	PEE/CICAM/08	RANGO BAJORANGO MEDIORANGO ALTO UNIDADES	
EFICIENCIA	%	85,60	NM	PEE/CICAM/08	PEE/CICAM/08	5,2	5,67 %
# DE HUMO		1	NM	IUE/CICAM/22	ASTM 2158-DIN 51402	7,35	5,87
* Parámetros acreditados por el OAE El informe aplica a la muestra tomada que se presenta Prohibida su reproducción en su totalidad sin previa autorización del laboratorio Los valores de incertidumbre están señalados en el presente informe Ante algún reclamo, ponerse en contacto con el laboratorio							
REALIZADO POR:  Ing. Nelson Salazar RESPONSABLE TÉCNICO GASES				REVISADO POR:  Ing. Carola Fierro DIRECTORA DE CALIDAD			
CARGAS CONTAMINANTES CALCULADAS A 1013mbar, 0°C							
<b>CARGAS CONTAMINANTES</b>							
PARAMETRO	UNIDAD						
carga cont. CO	ng / m <sup>3</sup> gscn					15% O <sub>2</sub>	
carga cont. SO <sub>2</sub>	ng / m <sup>3</sup> gscn					1,95	
carga cont. NO <sub>x</sub>	ng / m <sup>3</sup> gscn					126,18	
carga cont. Partículas	ng / m <sup>3</sup> gscn					58,52	
<b>INCERTIDUMBRES</b>							
PARAMETRO	RANGO BAJORANGO MEDIORANGO ALTO UNIDADES						
CO	5,2					5,67 %	
NO <sub>x</sub>	5,2					5,65 %	
SO <sub>2</sub>	7,35					2,75 %	

**Tema 2:** Análisis de Gases del Caldero N°3 del IESS Hospital de Ambato (Nuevo Sistema de Control).



**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**

**CENTRO DE INVESTIGACIONES  
Y CONTROL AMBIENTAL  
(CICAM)**

**INFORME DE CARACTERIZACIONES GASEOSAS**

**N° IR13029G**

**HOSPITAL DEL IESS (AMBATO)**

**CALDERO**

**FECHA: 23/10/13**



## ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E. 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: [cicamepn@gmail.com](mailto:cicamepn@gmail.com) Quito – Ecuador



### 1. INFORMACIÓN BÁSICA

#### 1.1. CLIENTE

EMPRESA	Hospital IESS (Ambato)
PERSONA DE CONTACTO	Diana Medina- Diego Vargas
CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN	Tres Mediciones de Caldero
DIRECCIÓN	Calle Dr. Rodrigo Pachano 10-76 y Eduardo Martínez Ambato - Tungurahua
TELÉFONO	-----

#### 1.1. EMPRESA RESPONSABLE DEL MONITOREO

EMPRESA	Centro de Investigaciones y Control Ambiental (CICAM); EPN
DIRECCIÓN	Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R". Ladrón de Guevara E 11-253 y Andalucía
TELÉFONO	2507 – 144 ext. 2623, 2221-306
EMAIL	<a href="mailto:cicamepn@gmail.com">cicamepn@gmail.com</a>
SOLICITUD DE TRABAJO °N	

### 2. INTRODUCCIÓN

#### 2.1. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El estudio realizado se hace con el fin de determinar la concentración de gases y material particulado de combustión proveniente de la fuente fija deL Caldero MDHAWK 4-6-75 (Superior) ubicado en el Hospital del IESS de Ambato y evaluar el cumplimiento de la legislación ambiental al compararlos con el libro VI anexo III, anexo III A del TULAS (DE/CICAM/16).

#### 2.2. DEFINICIONES

##### 2.2.1 Chimenea

Conducto que facilita el transporte hacia la atmósfera de los productos de combustión generados en la fuente fija.

##### 2.2.2 Combustión

Oxidación rápida, que consiste en una combinación del oxígeno con aquellos materiales o sustancias capaces de oxidarse, dando como resultado la generación de gases, partículas, luz calor.

##### 2.2.3 Condiciones normales

Cero grados centígrados (0 °C) y mil trece milibares de presión (1 013 mbar).

##### 2.2.4 Contaminante del aire

Cualquier sustancia o material emitido a la atmósfera, sea por actividad humana o por procesos naturales, y que afecta adversamente al hombre o al ambiente.



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 2.2.5 Contaminantes comunes del aire

Cualquier contaminante del aire para los cuales se especifica un valor máximo de concentración permitida, a nivel del suelo, en el aire ambiente, para diferentes períodos de tiempo, según la normativa aplicable.

### 2.2.6 Fuente fija de combustión

Es aquella instalación o conjunto de instalaciones, que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, y que emite o puede emitir contaminantes al aire, debido a proceso de combustión, desde un lugar fijo o inamovible.

### 2.2.7 Material particulado

Está constituido por material sólido o líquido en forma de partículas, con excepción del agua no combinada, presente en la atmósfera en condiciones normales.

### 2.2.8 Índice de isocinetismo

Relación entre la velocidad de succión en la boquilla y la velocidad del gas en la chimenea. El margen de error aceptado para validar los resultados del muestreo de Material Particulado (MP) es del  $\pm 10\%$ .

### 2.2.9 Temperatura de combustión

La temperatura de combustión suficientemente elevada es un requisito para una combustión completa. La temperatura a la cual se efectúa la combustión apropiada es principalmente una función de incineración del compuesto orgánico que interesa.

## 2.3 MÉTODO DE MONITOREO

### 2.3.1 PROCEDIMIENTO DE MONITOREO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA

Previo a la ejecución del monitoreo los técnicos planifican aspectos como cuidado de los equipos, ejecución del monitoreo, sujeción de la sonda isocinética, seguridad personal, provisión de energía eléctrica, zonificación del trabajo además de consultar con los operadores alguna indicación que sea de beneficio mutuo.

### 2.3.2 MONITOREO ISOCINÉTICO DE PARTÍCULAS

Primeramente se realiza un estudio de velocidades para determinar la boquilla a ser utilizada en el monitoreo, posteriormente ubicada la boquilla se realiza una prueba de fugas al equipo para evitar datos erróneos en la medición.

Se calculan la cantidad de puntos de muestreo con los datos físicos de la chimenea (Diámetro, neplo del puerto, A, B, etc). Estos datos se determinan de acuerdo al Libro VI Anexo 3 del Tulas (DE/CICAM/16) referido como documento de información.

Se analiza en cada punto y se recolectan datos de presión y temperatura hasta conseguir la recolección de mínimo 0.6 metros cúbicos en base seca, y obteniendo un porcentaje de isocinetismo de entre 90 a 110 %.

### 2.3.3 LEGISLACIÓN APLICABLE

- Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión (TULAS LIBRO VI ANEXO III (DE/CICAM/16), Ordenanza de Quito 213(DE/CICAM/14)).



## ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E. 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 2.3.4 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE GASES

Antes de un monitoreo de gases se debe determinar el número de punto de medición tomando las dimensiones geométricas de la fuente fija y utilizando lo referido en el TULAS LIBRO VI anexo 3 (DE/CICAM/16).

Posteriormente se realiza el siguiente procedimiento:

1. Encender el equipo
2. Esperar que se encere. Esta operación dura alrededor de 60 segundos
3. Se verifica que la fecha y hora sean correctas en la unidad de control-system-change date, se puede ajustar el dato en el caso de que no sea correcto.
4. Para empezar la medición, se debe crear una carpeta en donde se contengan los datos medidos con el equipo. Para esto, se debe ingresar a la opción "Testo Measuring". Con la tecla de selección izquierda se ingresa a la memoria que contiene todas las carpetas y registros de medida del equipo. Para la creación de una nueva carpeta, se siguen los siguientes pasos:
5. En la pantalla seleccionar la opción "change" y luego "New file o new location" dependiendo de si se tienen muchos equipos en una sola empresa o solo uno, respectivamente.
6. Creada la carpeta se procede a la medición de los parámetros. Para esto se siguen los siguientes pasos:
  - Programar al equipo de acuerdo al número de puntos determinados para el equipo a ser monitoreado.
7. Se debe verificar el tipo de combustible a utilizar de la siguiente manera:
  - Presionar la tecla de carpeta y seleccionar "Input", posteriormente fuel.
  - Finalmente seleccionar el combustible de acuerdo al que se utilice en el equipo a ser medido.
8. Posteriormente, ubicar la sonda en el puerto y prender la bomba con la opción "Pump" detallada en la pantalla principal.
9. Presionar opción "star" en la pantalla.
10. Cuando se termine el muestreo, en la pantalla se indicará que las celdas por las que pasa el gas contaminado se están limpiando; aparecerá en la pantalla un dialogo diciendo "refresh air".
11. Terminado este proceso se termina con el muestreo. Los datos se almacenan en la memoria de la unidad de control.
12. Posteriormente, se apaga la bomba con la opción PStop mostrada en la pantalla principal.
13. Realizada la medición, se necesita, en algunos casos, la impresión de los parámetros como un respaldo adicional o para una referencia que necesite el cliente. Para esto existe la opción de imprimir la(s) medición (es), se siguen los siguientes pasos:
  - Seleccionar la carpeta
  - Luego Memory seguido de Read out memory. Seleccionando estas opciones aparecen las mediciones realizadas para un cierto equipo o empresa.
  - Se abre alguno de los archivos y se selecciona la tecla print para imprimir los datos.
14. Además de la medición de gases se realiza una medida de opacidad. Esta medida se la realiza con la bomba de humo así:
  - Se pone el papel filtro en la cavidad de la bomba.
  - Se introduce la punta metálica de la bomba de humo en el puerto.
  - Se succiona 10 veces asegurando que el émbolo recorra toda la cámara.
  - Posteriormente comparar con la escala.
15. De la misma manera con el equipo se realiza la medida de flujo expresada en m<sup>3</sup>/h de la siguiente manera:
  - Presionar la tecla v<sub>on</sub>, así el equipo se encera automáticamente y empieza la medición del flujo de gas.
  - Esperar a que la medida se estabilice.
  - Presionar la tecla v<sub>off</sub>, para detener la medición del flujo. Las teclas v<sub>on</sub> y v<sub>off</sub> son una misma y se localizan en el menú del display del equipo.
16. Finalmente los datos obtenidos serán registrados en el formato F-PEE-CICAM-05-04 "RESULTADOS DE EMISIONES GASEOSAS"



**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL**

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
 RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
 • E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 2.3.5 PARÁMETROS DE MEDICIÓN

Los parámetros medidos fueron:


- Temperatura (°C)
- Porcentaje de O<sub>2</sub> (%)
- Emisión de SO<sub>2</sub> (mg / N m<sup>3</sup>)
- Emisión de NO<sub>2</sub> (mg / N m<sup>3</sup>)
- Emisión de NO (mg / N m<sup>3</sup>)
- Emisión de CO (mg / N m<sup>3</sup>)

### PARÁMETROS CONTROLADOS

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO ANALÍTICO	MÉTODO DE ENSAYO
Flujo de gas seco	m <sup>3</sup> /h	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 2	USEPA M1, M2B
Temperatura	°C		PEE/CICAM/08
Oxígeno	%	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 3	PEE/CICAM/08
Material Particulado	mg/m <sup>3</sup>	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 5, Revisión 1996	PEE/CICAM/10
*Monóxido de Carbono (CO)	ppm	EPA CTM 30 Revisión 1997, EPA CTM 34 Revisión 1999	PEE/CICAM/08
*Monóxido de Nitrógeno (NO)	ppm		PEE/CICAM/08
*Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	ppm		PEE/CICAM/08
*Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	ppm		PEE/CICAM/08

\*Parámetros acreditados por el OAE

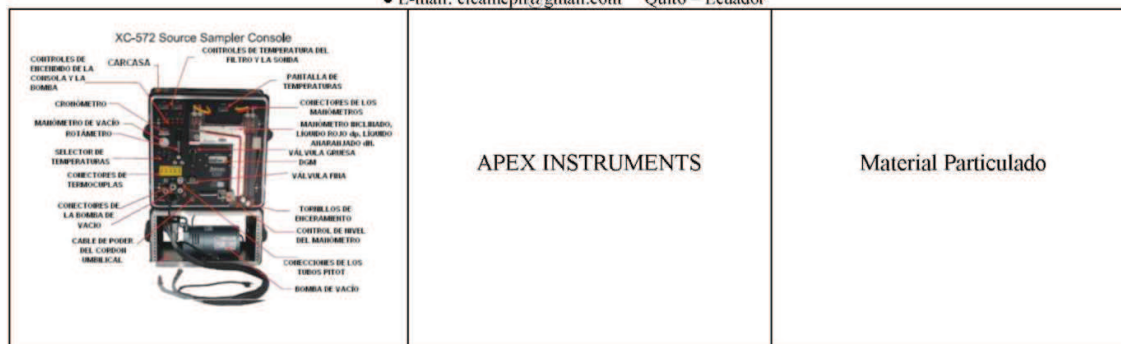
### 2.3.6 EQUIPOS

EQUIPO	MARCA	PARÁMETROS
Equipo medidor de gases 	Testo 350 XL	Temperatura Flujo CO NO NO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub>





**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL**  
 Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E. 11-253  
 RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
 • E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 2.3.7 CÁLCULOS

En el reporte de gases, cada parámetro posee una cierta concentración ver Gráfico 1, pero para el reporte final y para transformarlo a condiciones normales, se aplica las siguientes formulas:

#### Conversión de ppm a mg/m<sup>3</sup> referido al valor de O<sub>2</sub> de referencia

$$\text{CO (mg/m}^3\text{)} \quad \text{CO} = \frac{21 - \text{O}_2 \text{ referencia}}{(21 - \text{O}_2)} \times \text{CO (ppm)} \times 1.25$$

21 : Contenido de oxígeno del aire  
 O<sub>2</sub> : Contenido de oxígeno medido

$$\text{NO}_x \text{ (mg/m}^3\text{)} \quad \text{NO}_x = \frac{21 - \text{O}_2 \text{ referencia}}{(21 - \text{O}_2)} \times \text{NO}_x \text{ (ppm)} \times 2.05$$

21 : Contenido de oxígeno del aire  
 O<sub>2</sub> : Contenido de oxígeno medido

$$\text{SO}_2 \text{ (mg/m}_3\text{)} \quad \text{SO}_2 = \frac{21 - \text{O}_2 \text{ referencia}}{21 - \text{O}_2} \times \text{SO}_2 \times 2.86$$

*Referencia: Manual del equipo TESTO 350-XL*



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito – Ecuador



### 3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados finales de las emisiones gaseosas medidas y las respectivas normativas.

#### COMPARACION CON LA NORMATIVA

Mediciones a condiciones normales y corregidas a 7% de oxígeno.

#### MEDICIÓN #1

Parámetro	MEDICIÓN (mg/Nm <sup>3</sup> )	NORMA 1 (mg/Nm <sup>3</sup> )	NORMA2 (mg/Nm <sup>3</sup> )
*CO	6,88	-----	-----
*SO <sub>2</sub>	220,52	1650	1650
*NO <sub>x</sub>	244,62	700	700
Particulado	-----	355	355

#### MEDICIÓN #2

Parámetro	MEDICIÓN (mg/Nm <sup>3</sup> )	NORMA 1 (mg/Nm <sup>3</sup> )	NORMA2 (mg/Nm <sup>3</sup> )
*CO	<1	-----	-----
*SO <sub>2</sub>	241,23	1650	1650
*NO <sub>x</sub>	261,37	700	700
Particulado	-----	355	355

#### MEDICIÓN #3

Parámetro	MEDICIÓN (mg/Nm <sup>3</sup> )	NORMA 1 (mg/Nm <sup>3</sup> )	NORMA2 (mg/Nm <sup>3</sup> )
*CO	12,99	-----	-----
*SO <sub>2</sub>	233,47	1650	1650
*NO <sub>x</sub>	228,20	700	700
Particulado	-----	355	355

#### \*Parámetros acreditados por el OAE

##### Normas

1.-Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión. Norma para fuentes en operación antes de Enero del 2003. (mg/Nm<sup>3</sup>); miligramos por metro cúbico de gas a condiciones normales de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, corregidos a 7% de O<sub>2</sub>, en base seca. Establecidos en el TULAS-Libro VI-Anexo 3 –Tabla 1 (DE/CICAM/16).

2.-Límites máximos permisibles de emisiones al aire para calderos generadores de vapor. Norma para fuentes en operación antes de Enero del 2003. (mg/Nm<sup>3</sup>); miligramos por metro cúbico de gas a condiciones normales de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, corregidos a 7% de O<sub>2</sub>, en base seca. Establecidos en el TULAS-Libro VI-Anexo 3A –Tabla 1 (DE/CICAM/16).



## ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253  
RUC: 1760005620001 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 2623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759  
• E-mail: cicamepn@gmail.com Quito - Ecuador



**Gráfico 1 ( Mediciones Gases)**

**Medición#3**

**Medición#1**




**Medición#2**

Máxima Potencia	
Testo t350 XL	
Testo t350 XL	
SN: 01810805 /USA	
ESCUELA POLITECNICA CICAM CONTROL AMBIENTAL	
Gases amb	
Settings:	
Sample time:	8 min
Rinse time:	5 min
Data rate:	60 sec
Calc. Mean value:	Yes
Calc. average mean:	
182.7	°C Tf
1.89	% O2
14.19	% CO2
7	ppm CO
75	ppm NOx
55	ppm SO2
75	ppm CxHy
86.7	% Eff
9.2	% ExR
0.97	1/m Pump
75	ppm NO
0.0	ppm NO2
---	inW ap
9.0	m <sup>3</sup> /h FLOW
---	V Batt
---	m/s Vel
from: 10/23/13 13:07:51 to: 10/23/13 13:16:06	
Number: 0008	
Diesel	
from: 10/23/13 13:07:51 to: 10/23/13 13:16:06	
Number: 0008	
Tf O2 CO2	
01	174.0 2.06 14.06
02	179.9 1.95 14.15
03	182.0 1.89 14.19
04	182.5 1.92 14.17
05	184.2 1.86 14.21
06	185.2 1.82 14.24
07	186.3 1.80 14.26
08	187.3 1.79 14.26
CO NOx SO2	
01	6 73 24
02	6 74 48
03	7 74 55
04	7 74 57
05	7 75 61
06	7 75 66
07	8 76 64
08	7 76 66
CxHy Eff ExR	
01	87.0 10.1
02	86.8 9.5
03	86.7 9.2
04	86.7 9.3
05	86.6 9.0
06	86.6 8.8
07	86.6 8.7
08	86.5 8.7
Pump NO NO2	
01	0.95 73 0.0
02	0.99 74 0.0
03	0.98 74 0.0
04	0.97 74 0.0
05	0.97 75 0.0
06	0.97 75 0.0
07	0.97 76 0.0
08	0.98 76 0.0
ap FLOW Batt	
01	inW m <sup>3</sup> /h V
01	8.9

Minima Potencia	
Testo t350 XL	
Testo t350 XL	
SN: 01810805 /USA	
ESCUELA POLITECNICA CICAM CONTROL AMBIENTAL	
Gases amb	
Settings:	
Sample time:	8 min
Rinse time:	5 min
Data rate:	60 sec
Calc. Mean value:	Yes
Calc. average mean:	
135.4	°C Tf
5.55	% O2
11.47	% CO2
3	ppm CO
65	ppm NOx
42	ppm SO2
---	ppm CxHy
87.7	% Eff
33.2	% ExR
1.01	1/m Pump
65	ppm NO
0.2	ppm NO2
---	inW ap
8.9	m <sup>3</sup> /h FLOW
---	V Batt
---	m/s Vel
from: 10/23/13 11:58:33 to: 10/23/13 12:06:47	
Number: 0008	
Diesel	
from: 10/23/13 11:58:33 to: 10/23/13 12:06:47	
Number: 0008	
Tf O2 CO2	
01	130.4 5.54 11.47
02	132.1 5.52 11.49
03	133.5 5.53 11.48
04	135.0 5.54 11.47
05	136.4 5.54 11.47
06	137.5 5.52 11.48
07	138.7 5.58 11.44
08	139.6 5.59 11.44
CO NOx SO2	
01	4 65 36
02	3 65 41
03	3 65 42
04	3 65 43
05	2 65 43
06	2 66 44
07	2 66 45
08	2 66 46
CxHy Eff ExR	
01	87.9 33.1
02	87.8 33.0
03	87.9 33.0
04	87.7 33.1
05	87.6 33.1
06	87.5 33.0
07	87.5 33.5
08	87.4 33.5
Pump NO NO2	
01	0.99 64 0.3
02	1.02 64 0.5
03	1.02 65 0.2
04	1.01 65 0.0
05	1.01 65 0.0
06	1.01 66 0.0
07	1.01 66 0.0
08	1.01 66 0.0
ap FLOW Batt	
01	inW m <sup>3</sup> /h V
01	8.9

Media Potencia	
Testo t350 XL	
Testo t350 XL	
SN: 01810805 /USA	
ESCUELA POLITECNICA CICAM CONTROL AMBIENTAL	
Gases amb	
Settings:	
Sample time:	8 min
Rinse time:	5 min
Data rate:	60 sec
Calc. Mean value:	Yes
Calc. average mean:	
165.6	°C Tf
6.54	% O2
10.72	% CO2
0	ppm CO
65	ppm NOx
43	ppm SO2
---	ppm CxHy
85.7	% Eff
41.8	% ExR
0.98	1/m Pump
65	ppm NO
0.0	ppm NO2
---	inW ap
8.9	m <sup>3</sup> /h FLOW
---	V Batt
---	m/s Vel
from: 10/23/13 12:17:54 to: 10/23/13 12:26:09	
Number: 0008	
Diesel	
from: 10/23/13 12:17:54 to: 10/23/13 12:26:09	
Number: 0008	
Tf O2 CO2	
01	159.5 6.57 10.71
02	162.4 6.54 10.73
03	164.0 6.57 10.71
04	165.9 6.56 10.71
05	167.0 6.59 10.69
06	167.8 6.61 10.68
07	168.8 6.49 10.76
08	169.6 6.43 10.81
CO NOx SO2	
01	0 65 38
02	0 65 41
03	0 65 43
04	0 65 43
05	0 65 44
06	0 65 45
07	0 65 45
08	0 66 45
CxHy Eff ExR	
01	86.1 42.1
02	85.9 41.8
03	85.8 42.0
04	85.7 42.0
05	85.6 42.2
06	85.6 42.4
07	85.6 41.3
08	85.5 40.8
Pump NO NO2	
01	0.99 65 0.0
02	0.99 65 0.0
03	0.98 65 0.0
04	0.99 65 0.0
05	0.98 65 0.0
06	0.98 65 0.0
07	0.98 65 0.0
08	0.98 66 0.0
ap FLOW Batt	
01	inW m <sup>3</sup> /h V
01	8.9



E.P.N. CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL		RESULTADOS DE EMISIONES GASEOSAS				
	HOSPITAL DEL IESS AMBATO	FECHA DE MUESTREO	23/10/2013			
CONTACTO	Diana Medina Calle Dr. Rodrigo Pachano 10-76 y Eduardo Martinez	FECHA DE REALIZACIÓN	23/10/2013			
DIRECCIÓN	CALLE DR. RODRIGO PACHANO 10-76 Y EDUARDO MARTINEZ	CÓDIGO DEL INFORME	IR13029G			
POTENCIA	125 BHP	SOLICITUD DE TRABAJO				
TIPO DE FUENTE	Caldero					
AÑO DE INICIO DE OPERACIÓN	1981	TEMPERATURA	24			
MODELO/SERIE	MDHAWK 4-6-75	HUMEDAD	37%			
CARGA DE TRABAJO	6008 LBHR					
COMBUSTIBLE	Diesel					
MONITOREADO POR	Nelson Salazar					
<b>PARÁMETROS, LÍMITES PERMISIBLES Y METODOS EMPLEADOS</b>						
PARÁMETRO	UNIDAD	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3	MÉTODO INTERNO	MÉTODO DE REFERENCIA
FLUJO DE GAS SECO	m <sup>3</sup> /h	706,20	996,70	1223,1000	PEE/CICAM/08	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 2
TEMPERATURA	° C	135,40	185,60	182,7	PEE/CICAM/08	A, Método 2
OXÍGENO	%	5,55	5,54	1,89	PEE/CICAM/08	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 3
DIOXIDO DE CARBONO	%	11,47	10,72	14,19	PEE/CICAM/08	
*MONÓXIDO DE CARBONO	ppm	3,00	< 1	7	PEE/CICAM/08	EPA CTM 30, EPA CTM 34
*DIOXIDO DE AZUFRE	ppm	42,00	43,00	55	PEE/CICAM/08	
*ÓXIDOS DE NITRÓGENO	ppm	65,00	65,00	75	PEE/CICAM/08	
PARTÍCULAS	g/m <sup>3</sup> gas seco	NM	NM	NM	PEE/CICAM/05	EPA, Parte 60, Apéndice A, Método 5
EXCESO DE AIRE	%	33,20	41,80	9,20	PEE/CICAM/08	PEE/CICAM/08
EFICIENCIA	%	87,70	85,70	86,7	PEE/CICAM/08	PEE/CICAM/08
# DE HUMO		2	2	2	IUE/CICAM/22	ASTM 2156-DIN 51402
<b>CARGAS CONTAMINANTES CALCULADAS A 1013mbar, 0°C</b>						
CARGAS CONTAMINANTES	UNIDAD	Medida 1 corregida al	Medida 2 corregida al	Medida 3 corregida al		
PARÁMETRO						
carga cont. CO	ng / m <sup>3</sup> gscn	7% O2	7% O2	7% O2		
carga cont. SO2	ng / m <sup>3</sup> gscn	6,88	<1	12,99		
carga cont. NOX	ng / m <sup>3</sup> gscn	220,52	241,23	233,47		
carga cont. Partículas	ng / m <sup>3</sup> gscn	244,62	261,37	228,20		
<b>INCERTIDUMBRES</b>						
PARAMETRO	RANGO BAJO	RANGO ALTO	UNIDADES			
CO	NA	3,5-44	NA	%		
NOX	NA	3,2-58	NA	%		
SO2	NA	2,289	NA	%		
<b>PARAMETROS ACREDITADOS POR EL OAE</b>						
* Parámetros acreditados por el OAE						
El informe aplica a la muestra tomada que se presenta						
Prohibida su reproducción en su totalidad sin previa autorización del laboratorio						
Los valores de incertidumbre están señalados en el presente informe						
Ante algún reclamo, ponerse en contacto con el laboratorio						
REALIZADO POR			REVISADO POR:	X 		
	Ing. Nelson Salazar			Ing. Carola Fierro		
	RESPONSABLE TÉCNICO GASES			DIRECTORA DE CALIDAD		

**ANEXO 13**

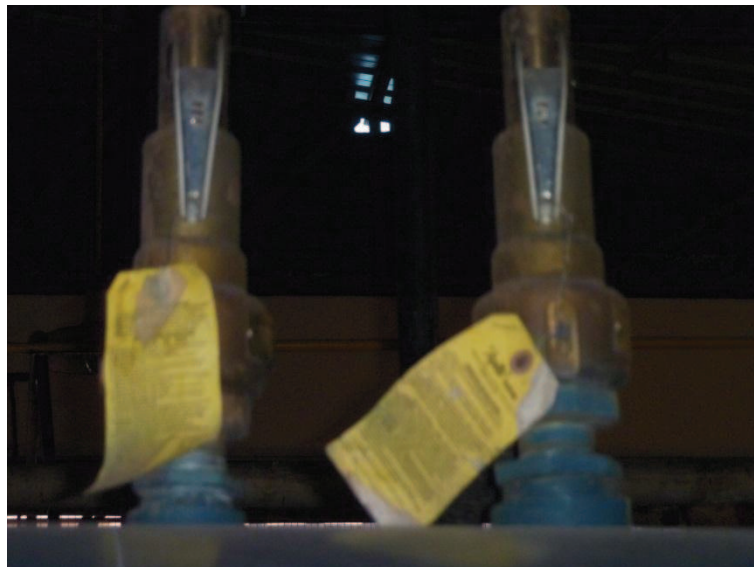
**Tema 1: Fotos Caldero N° 03 IESS Hospital de Ambato**



Caldero N° 03 Hospital IESS-Ambato



Medidores de Nivel y Presión



Válvulas de Seguridad

**Tema 2:** Fotos Caldero N° 03 IESS Hospital de Ambato, estado antiguo.



Panel de Control

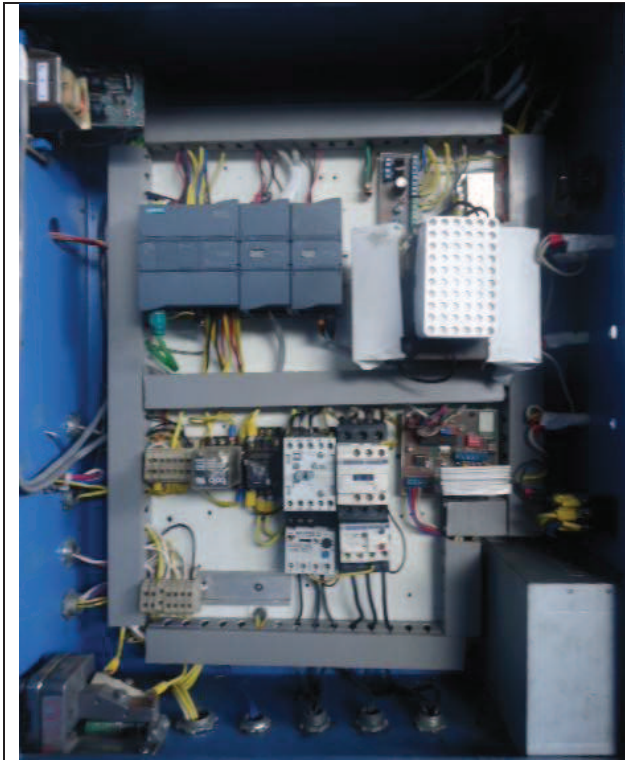


Tablero de Control

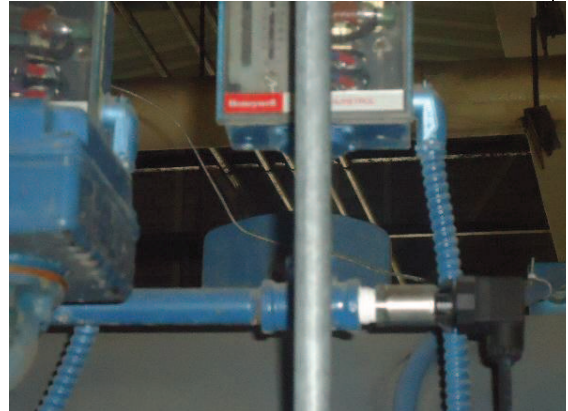


Acoplamiento mecánico regulación de combustión

**Tema 3:** Fotos Caldero N° 03 IESS Hospital de Ambato, estado actual.



Tablero de Control



Sensor de Presión Instalados



Elementos Individuales de Control de Combustión



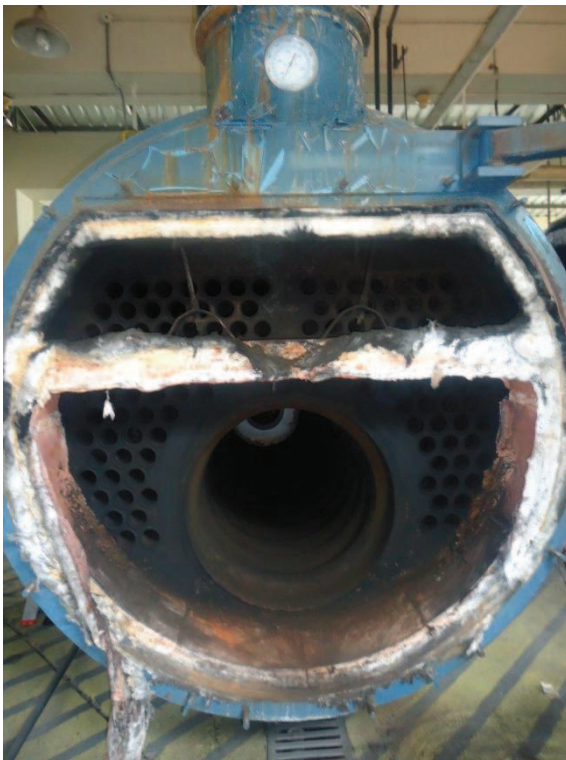
Termocupla Instalada



**Tema 4:** Fotos Mantenimiento Caldero N° 03 IESS Hospital de Ambato.



Vista Frontal



Vista Posterior



Cámara de Combustión

**Tema 5: Fotos Análisis de Gases Caldero N° 03 IESS Hospital de Ambato.**



Equipo Analizador de Material Particulado



Punto de Análisis



Boquilla de Succión