

**SIMULACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO DE UNA
CALDERA PIROTUBULAR BAJO CONTROL ON-OFF Y CONTINUO**

**JAVIER LEONARDO BOTIA BECERRA
MANUEL JOSÉ PARRA CONTRERAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.005

**SIMULACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO DE UNA
CALDERA PIROTUBULAR BAJO CONTROL ON-OFF Y CONTINUO**

**JAVIER LEONARDO BOTIA BECERRA
MANUEL JOSE PARRA CONTRERAS**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.005

DEDICATORIA

A mis padres por apoyarme y motivarme a alcanzar todas mis metas.

A mis hermanos quienes compartieron y compartirán mis alegrías y tristezas.

A Marisol y Daniel Felipe que son el eje principal de motivación a alcanzar todas mis metas.

A mi familia.....

Javier Leonardo Botía.

DEDICATORIA

A Dios,

A mi madre piedra angular de toda vida, valor incalculable para este triunfo y el máximo orgullo de mi vida,

A mis hermanos Sandra Milena, Héctor Alcides y Camilo Ernesto por el cariño, apoyo y animo que me han brindado.

A mi papa,

A quienes de una o otra manera colaboraron para que yo terminara.

Manuel Parra

AGRADECIMIENTOS

A la universidad industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería mecánica por permitirnos crecer como personas y formarnos como profesionales.

A Omar Gélvez Arocha, Ingeniero Mecánico, director del proyecto y amigo, por su enseñanza y colaboración en la realización de este proyecto y vida universitaria.

A Alfredo Acevedo por su valiosa ayuda en los momentos que requerimos de su colaboración.

A Alfonso Ramírez Carvajal, ingeniero Mecánico, por su asesoría y colaboración desinteresada en este proyecto.

A Omar Lenguerke por que sin su contribución no hubiéramos terminado a tiempo este proyecto.

A Gleidy Valbuena por su colaboración en el desarrollo del modelo de generación de vapor.

A todos los amigos y compañeros que nos respaldaron y alentaron para el feliz termino de este proceso.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. CALDERAS	22
1.1 DEFINICIÓN	22
1.2 TIPOS DE CALDERAS	23
1.2.1 <i>Según la circulación del agua o gases por los tubos.</i>	24
1.2.3 <i>Según la configuración</i>	31
1.3 COMBUSTIBLES PARA CALDERAS	32
1.3.1 <i>Clasificación de los combustibles.</i>	33
2. GENERALIDADES Y DISPOSITIVOS DE CONTROL.....	39
2.1 CONCEPTOS SOBRE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO	41
2.2 SISTEMAS DE CONTROL	43
2.2.1 <i>Sistema de control de lazo abierto.</i>	43
2.2.2 <i>Sistema de control de lazo cerrado.</i>	43
2.3 ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL.....	44
2.4 DISPOSITIVOS DE CONTROL	46
2.4.1 <i>Clasificación de los dispositivos de control.</i>	47
3. SISTEMAS BÁSICOS DE UNA CALDERA PIROTUBULAR	59
3.1. SISTEMA DE COMBUSTIÓN	61
3.1.1 <i>Subsistemas del sistema de combustión</i>	62
3.2 SISTEMA DE AGUA.	69
3.2.1 <i>Sistema de vaporización de agua.</i>	69
3.2.2 <i>Sistema de agua de alimentación.</i>	70
3.3 SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO	77

3.3.1	<i>Dispositivos de control de la caldera.....</i>	<i>80</i>
4.	SIMULACIÓN	120
4.1	SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA CALDERA PIROTUBULAR.....	121
4.1.1	<i>Modelos matemáticos</i>	<i>122</i>
4.1.2	<i>Requerimientos y resultados de la simulación.....</i>	<i>144</i>
4.1.3	<i>Que se puede hacer con la simulación.....</i>	<i>149</i>
4.2	RESPUESTA DE LA CALDERA A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN.....	150
4.2.1	<i>Calculo de Eficiencia.....</i>	<i>150</i>
4.2.2	<i>Respuesta del sistema ante cambios en el flujo de vapor</i>	<i>151</i>
4.2.3	<i>Respuesta del sistema ante cambios en la presión de trabajo</i>	<i>156</i>
5.	EVALUACION ENERGETICA.....	161
5.1	EFICIENCIA DE UNA CALDERA.....	161
5.1.1	<i>Factores que afectan la eficiencia.....</i>	<i>162</i>
5.1.2	<i>Métodos para la determinación de la eficiencia.....</i>	<i>163</i>
5.2	COMPORTAMIENTO DE LA CALDERA BAJO CONTROL CONTINUO	167
5.2.1	<i>Calculo del flujo de combustible.....</i>	<i>167</i>
5.2.2	<i>Procedimiento de la prueba.....</i>	<i>168</i>
5.2.3	<i>Resultados obtenidos.....</i>	<i>170</i>
5.2.4	<i>Análisis de resultados.....</i>	<i>173</i>
5.3	COMPORTAMIENTO DE LA CALDERA BAJO CONTROL ON-OFF.....	181
5.3.1	<i>Presión media.....</i>	<i>181</i>
5.3.2	<i>Consumo medio de combustible.....</i>	<i>181</i>
5.3.3	<i>Procedimiento de la prueba.....</i>	<i>182</i>
5.3.4	<i>Resultados obtenidos.....</i>	<i>183</i>
5.3.5	<i>Análisis de resultados.....</i>	<i>184</i>

5.4	COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA Y EL FLUJO DE COMBUSTIBLE OBTENIDO CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO CONTRA LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF.	187
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	188
6.1	CONCLUSIONES.....	188
6.2	RECOMENDACIONES.....	189
	BIBLIOGRAFÍA.....	190
	ANEXOS.....	191
	ANEXO 1. MANUAL DEL USUARIO.....	191
	ANEXO 2. ATRIBUTOS Y RANGOS DE LOS MODULOS FIELDPOINT	196
	ANEXO 3. PLANOS ELECTRICOS DEL TABLERO DE CONTROL CONTINUO	199

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Caldera pirotubular	24
Figura 2. Dimensiones de una caldera pirotubular.....	26
Figura 3. Caldera pirotubular de cámara húmeda.....	27
Figura 4. Caldera pirotubular de cámara seca	27
Figura 5. Caldera acuotubular.....	29
Figura 6. Caldera pirotubular tipo vertical	32
Figura 7. Sistema de control	39
Figura 8. Lazo de control	40
Figura 9. Tipos de señales. a) Digitales b) Análogas.....	42
Figura 10. Sistema de control de lazo abierto.....	43
Figura 11. Sistema de control de lazo cerrado.....	44
Figura 12. Autómata programable	52
Figura 13. Controlador industrial.....	53
Figura 14. Computador industrial.....	54
Figura 15. Microcontrolador	55
Figura 16. Sistema fieldpoint.....	57
Figura 17. Tarjeta de adquisición de datos	58
Figura 18. Esquema general de la caldera	60
Figura 19. Combustión en una caldera pirotubular	61
Figura 20. Componentes del sistema de aire	63
Figura 21. Sistema de combustible.....	64
Figura 22. Regulador de gas	65
Figura 23. Interruptor de presión.....	66
Figura 24. Válvula principal de combustible.....	66

Figura 25. Servo válvula de combustible	67
Figura 26. Manómetro tipo Bourdon	68
Figura 27. Sistema piloto de combustible	68
Figura 28. Llama de piloto normal del sistema de combustión	69
Figura 29. Elementos de vaporización de agua	70
Figura 30. Sistema agua de alimentación	71
Figura 31. Válvula multipuerto en posición 3	72
Figura 32. Válvula multipuerto en posición 1	73
Figura 33. Válvula multipuerto posición 2	74
Figura 34. Tanque de condensado	75
Figura 35. Bomba de alimentación	76
Figura 36. Instalación del suministro de agua a la caldera	77
Figura 37. Lazos de control en la caldera	79
Figura 38. Esquema eléctrico Fireye	81
Figura 39. Mc Donnell instalado en la caldera del laboratorio de plantas térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander	85
Figura 40. Control de nivel "Mc Donnell"	86
Figura 41. Control limite de presión	87
Figura 42. Terminales control auxiliar de nivel	88
Figura 43. Panel de control estrategia on-off	89
Figura 44. Banco Fieldpoint de monitoreo y control	91
Figura 45. Banco de módulos fieldpoint utilizado en la caldera	92
Figura 46. Modulo de red FP-1000	93
Figura 47. Modulo de Salidas Digitales FP-DO-400	94
Figura 48. Modulo de salidas analogas FP-AO-200	95
Figura 49. Modulo de entradas análogas FP-AI-110	96
Figura 50. Modulo contador FP-CTR-500	97
Figura 51. Modulo de termocuplas FP-TC-120	98
Figura 52. Implementación de una acción de control PID	103

Figura 53. Transductores de presión	106
Figura 54. Esquemas de conexión del Transductor de presión marca SETRA ...	106
Figura 55. Esquemas de conexión del Transductor de presión marca FOXBORO	107
Figura 56. Variador de velocidad del motor del ventilador	107
Figura 57. Esquema de conexión del variador al motor del ventilador.....	108
Figura 58. Variador de velocidad del motor de la bomba de alimentación de agua	110
Figura 59. Esquema de conexión del variador al motor de la bomba de alimentación de agua.....	110
Figura 60. Motor paso a paso y válvula proporcional.....	114
Figura 61. Tarjeta manejadora del motor paso a paso de la válvula proporcional	115
Figura 62. Diagrama esquemático de la tarjeta del motor PAP de la turbina.....	116
Figura 63. Tarjeta de flancos	118
Figura 64. Diagrama esquemático de la tarjeta de flancos	118
Figura 65. Tablero de control	119
Figura 66. Estructura de la simulación.....	122
Figura 67. Control continuo.....	124
Figura 68. Diagrama de flujo del control on-off	125
Figura 69. Modelo general de combustión y transferencia de calor.....	126
Figura 70. Modelo de combustión.....	127
Figura 71. Diagrama de flujo para el calculo de la temperatura de los gases en el tubo principal.	128
Figura 72. Transferencia de calor en un diferencial en un tubo secundario.....	129
Figura 73. Diagrama de flujo del modelo de transferencia de calor.	133
Figura 74. Generación de Vapor.....	136
Figura 75. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.26	140
Figura 76. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.25	140
Figura 77. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.27	141

Figura 78. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.28	141
Figura 79. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.24	142
Figura 80. Diagrama de bloques completo	143
Figura 81. Requerimientos de la simulación	144
Figura 82. Ventana en donde se ingresan los datos geométricos.	145
Figura 83. Ventana en donde se ingresan los datos operacionales.....	146
Figura 84. Ventana principal de simulación	147
Figura 85. Histórico de presión bajo control continuo	148
Figura 86. Histórico de consumo de combustible bajo control continuo	148
Figura 87. Histórico de presión bajo control on-off.....	149
Figura 88. Histórico de consumo de combustible bajo control on-off.....	149
Figura 89. Respuesta de la presión ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control continuo.	152
Figura 90. Respuesta del flujo de combustible ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control continuo.	152
Figura 91. Respuesta de la eficiencia ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control continuo.	153
Figura 92. Respuesta del vapor generado ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control continuo.	153
Figura 93. Respuesta de la presión ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control on-off.	154
Figura 94. Respuesta del flujo de combustible ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control on-off.....	155
Figura 95. Respuesta de la eficiencia media ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control on-off.	155
Figura 96. Respuesta del vapor generado ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control on-off.	156
Figura 97. Respuesta del sistema ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control continuo.	157

Figura 98. Respuesta del consumo de combustible ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control continuo.....	157
Figura 99. Respuesta de la eficiencia ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control continuo.	158
Figura 100. Respuesta del vapor generado ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control continuo.....	158
Figura 101. Respuesta del sistema ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control on-off.	159
Figura 102. Respuesta del flujo de combustible ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control on-off.	159
Figura 103. Respuesta de la eficiencia media ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control on-off.	160
Figura 104. . Respuesta del vapor generado ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control on-off.	160
Figura 105. Diagrama Sankey de flujos de energía a través de la caldera.....	165
Figura 106. Esquema seguido para realizar las pruebas en la caldera.	170
Figura 107. Consumo de combustible en operación bajo control continuo.....	171
Figura 108. Eficiencia en operación bajo control continuo.....	171
Figura 109. Balance de energía de la caldera para condiciones estables	173
Figura 110. Balance de energía de un diferencial de un tubo de la caldera.	175
Figura 111. Puntos de operación usados para análisis teórico.....	177
Figura 112. Ciclo de operación bajo control on-off.....	182
Figura 113. Consumo de combustible en operación bajo control on-off.	183
Figura 114. Eficiencia en operación bajo control continuo.....	184
Figura 115. Puntos de operación usados para análisis.	185
Figura 116. Histórico de consumo de combustible obtenido de simulación para un flujo de vapor de 450 lb/hr (operación bajo control on-off).....	186
Figura 117. Histórico de consumo de combustible obtenido de simulación para un flujo de vapor de 650 lb/hr (operación bajo control on-off).....	187

TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características técnicas caldera horizontal, Presión de 150 Psig.....	26
Tabla 2. Poderes calóricos de algunos combustibles	33
Tabla 3. Análisis próximo del carbones de Colombia	34
Tabla 4. Análisis ultimo de algunos tipos de carbón	34
Tabla 5. Características típicas de combustibles colombianos para calderas	37
Tabla 6. Especificaciones de la Caldera Piro-tubular del Laboratorio	59
Tabla 7. Nivel recomendado de exceso de aire y otros parámetros	62
Tabla 8. Relación aire-combustible.....	105
Tabla 9. Características eléctricas del Altivar 16	109
Tabla 10. Terminales de Control hacia el motor PAP	115
Tabla 11. Terminales de Potencia hacia el motor PAP.....	116
Tabla 12. Pines de Control	116
Tabla 13. Distribución de pérdidas de calor en una caldera	166
Tabla 14. Efecto de la variación del flujo de vapor.....	172
Tabla 15. Efecto del cambio en la presión de operación	172
Tabla 16. Tabla resultados obtenidos a través de la simulación, del efecto que causa el cambio en el flujo de vapor.....	178
Tabla 17. Tabla resultados obtenidos a través de la simulación, del efecto que causa el cambio de la presión de operación.....	180
Tabla 18. Efecto del cambio del flujo de vapor para operación bajo control on-off	186
Tabla 19. Comparación entre el rendimiento del sistema operando bajo control continuo y on-off	187

RESUMEN

TÍTULO:

SIMULACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO DE UNA CALDERA PIROTUBULAR BAJO CONTROL ON-OFF Y CONTINUO*.

AUTORES:

Javier Leonardo Botia Becerra.
Manuel José Parra Contreras.**

PALABRAS CLAVES:

Calderas, Caldera Pirotubular, Automatización, Sistemas de control, Eficiencia, Consumo de combustible, Simulación.

DESCRIPCIÓN:

Las calderas son parte esencial de muchas plantas industriales, y su eficiencia puede afectar significativamente los costos de operación, la rentabilidad y confiabilidad de la planta entera. Para conocer como se afecta el rendimiento de la caldera al efectuar cambios operacionales (flujo de vapor o presión), se debe realizar una evaluación energética, determinando así las condiciones de operación optimas de la caldera, con lo cual se busca que la energía disponible se consuma de una manera eficiente, obteniendo un potencial ahorro económico y energético, disminuyendo los impactos ambientales.

Para observar y evaluar las diferentes condiciones de trabajo de una caldera pirotubular, se utilizan diversas alternativas. En esta tesis se tratará de mostrar dos de las principales metodologías: La simulación del proceso de generación de vapor por medio de software y, la realización de pruebas directamente sobre la caldera, buscando evaluar la incidencia de la presión y el flujo de vapor sobre el consumo de combustible y la eficiencia de la caldera, tanto para operación bajo control on-off como para control continuo.

Como resultado de las pruebas, en términos generales se obtuvo mayores eficiencias y menores consumos de combustible con operación bajo control continuo, además, con esta estrategia del control el sistema se mantiene en condiciones más estables.

La simulación reporta resultados adecuados para los propósitos del trabajo, pero se presentan diferencias con los obtenidos en las pruebas reales. Para obtener resultados más cercanos a los reales se recomienda hacer un estudio más riguroso del proceso de conversión energética en la caldera pirotubular.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Ing Omar A. Gelvez

SUMMARY

TITLE:

SIMULATION AND QUANTIFICATION OF THE ENERGETIC SAVING OF A PIROTUBULAR BOILER UNDER ON OFF AND CONTINUUM CONTROL[†].

AUTHORS:

Javier Leonardo Botia Becerra.
Manuel José Parra Contreras.**

KEY WORDS:

Boilers, Pirotubular Boiler, Automation, Control Systems, Efficiency, Consumption of fuel, Simulation,

DESCRIPTION:

Boilers are an essential part of many industrial plants, and its efficiency, can affect significantly the operating costs, as well as the profitability and reliability of the entire plant. In order to know how is the performance of the boiler affected when operational changes occurs, an energetic evaluation must be made, determining thus the optimal boiler conditions of operation, which will lead to the use of available energy in an efficient manner, obtaining in return a potential economic and energetic saving, decreasing the environmental impacts .

In order to observe and evaluate the different conditions of work of a pirotubular boiler, at the present time, many alternatives are used. In this thesis we will try to show the two principal methodologies: The simulation of the process of steam-driven generation by means of software and the accomplishment of tests directly on the boiler. Looking for to evaluate the incidence of pressure and the steam-driven flow on the consumption of fuel and the efficiency of the boiler, both for operation under on-off control as for continuum control.

As a result of tests, in general terms, greater efficiencies were obtained and minor fuel consumptions with operation under continuous control, besides, with this control strategy the system maintains the conditions stable.

The simulation, reports adequate results for the goals of the work, but differences are present with the results obtained from real tests. In order to obtain closer results to the real it is recommended doing a more rigorous study of the process of energetic conversion in the pirotubular boiler.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering. Omar Gélvez, Eng.

INTRODUCCIÓN

En Colombia el Uso Racional de la Energía es considerado como un asunto de interés social y público; por lo tanto se debe buscar que la energía disponible se consuma de una manera eficiente, con el fin de lograr un óptimo aprovechamiento de los recursos naturales en toda la cadena energética con lo cual se genera un ahorro de índole económico y se disminuye el impacto ambiental producido tanto por la emisión de agentes contaminantes (CO, NO_x, SO₂, partículas) contenidos en los gases de combustión, como por la explotación de los combustibles utilizados como fuente energética.

Para observar y evaluar las diferentes condiciones de trabajo de una caldera pirotubular, se utilizan diversas alternativas. En esta tesis se tratara de mostrar dos de las principales metodologías: La simulación del proceso de generación de vapor por medio de software y, la realización de pruebas directamente sobre la caldera, buscando evaluar la incidencia de la presión y el flujo de vapor sobre el consumo de combustible y la eficiencia de la caldera, tanto para control on-off como para control continuo.

En el capítulo 1, se tratan temas acerca de calderas, generalidades, tipos y combustibles utilizados.

En el capítulo 2, se habla de generalidades de control, acciones de control y dispositivos utilizados para el control (autómata, microcontroladores, control basado en PC).

En el capítulo 3, se presentan los sistemas básicos de una caldera tales como el sistema de combustión, el sistema de agua (alimentación y vaporización) y el control que se puede hacer de los diferentes elementos con los que cuenta la

caldera como nivel de agua, control de presión y control de combustión bajo las dos estrategias de control implementadas.

En el capítulo 4, se presenta la simulación; los modelos y ecuaciones para el control, la combustión, la transferencia de calor y la generación de vapor utilizadas en esta, así como los datos de entrada requeridos y los resultados que se pueden obtener.

En el capítulo 5, se presentan los resultados de las pruebas realizadas en la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas de la escuela de ingeniería mecánica, para lo cual se inicia definiendo eficiencia de caldera, los factores que la afectan y los métodos de cuantificación; finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

1. CALDERAS

1.1 DEFINICIÓN

El término caldera, en general se puede aplicar a generadores de vapor, que son recipientes metálicos de paredes convenientemente resistentes, construidos en planchas de acero, generalmente destinados a vaporizar el agua y producir el vapor en cantidades, presiones y temperaturas tan grandes como se precisen, aprovechando para ello el calor desarrollado en la reacción de un combustible con aire o también de gases calientes provenientes de un proceso externo.

Dependiendo del tipo de caldera, el vapor producido puede ser saturado o sobrecalentado. Las calderas han sido fabricadas de muchas formas y para quemar una gran variedad de combustibles. El hierro colado, el acero, cobre y combinaciones de estos metales, han sido utilizados en la construcción de calderas.

Una caldera tiene un solo propósito, transferir el calor producido por el combustible quemado al agua, para vaporizarla. Esta transferencia de calor se logra a través de todas las superficies metálicas que estén en contacto con los gases de combustión y el agua; se les llama superficies de calentamiento.

Para cumplir su función adecuadamente una caldera esta conformada por subsistemas, estos realizan tareas específicas encaminadas a garantizar un desempeño óptimo de la caldera y brindar seguridad tanto al operario como al equipo.

La caldera esta integrada por los siguientes subsistemas

- sistema de combustión.
- sistema eléctrico.
- sistema de alimentación y vaporización de agua
- sistema de control, monitoreo y seguridad.

1.2 TIPOS DE CALDERAS

Las calderas se clasifican de acuerdo con algunas de sus características y con la naturaleza del servicio, estas pueden ser: circulación del agua o de los gases por los tubos, configuración geométrica, clase de combustible quemado, vapor saturado y sobrecalentado, tamaño.

Según la circulación del agua o gases por los tubos, se puede definir los siguientes tipos de calderas:

- Calderas pirotubulares.
 - ✓ Cámara seca
 - ✓ Cámara húmeda
- Calderas Acuotubulares.
 - ✓ Circulación Natural
 - ✓ Circulación Controlada
 - ✓ Circulación forzada

Según su configuración podemos definir dos tipos de caldera

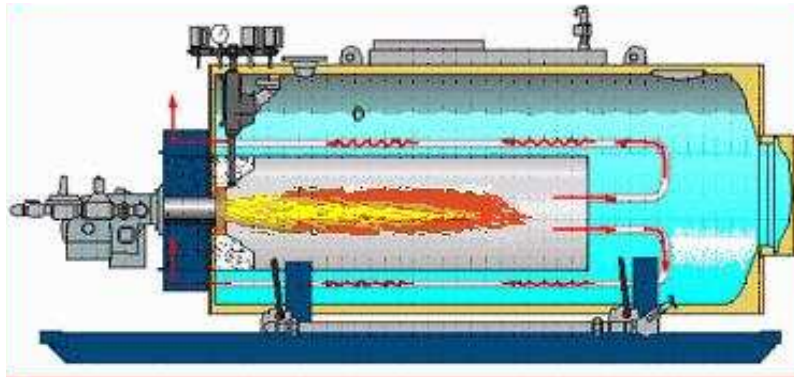
- Caldera Horizontal

- Caldera Vertical

1.2.1 Según la circulación del agua o gases por los tubos.

➤ **Caldera pirotubular.** Como su nombre lo indica, el gas de combustión circula por dentro de tubos y el agua los rodea. Ver figura 1.

Figura 1. Caldera pirotubular



La caldera pirotubular comprende un cilindro con placas de tubos fijos en los extremos, con una serie de tubos que van de placa a placa, una cámara de combustión instalada en forma que los gases calientes de la combustión circulen por los tubos. El agua está contenida en el tambor y circunda los tubos para el intercambio de calor y producción de vapor.

Las calderas pirotubulares se diseñan para presiones hasta de 250 Psig, capacidad desde un 1 BHP hasta aproximadamente 900 BHP. La máxima producción de vapor es de 30.000 lb/hr y sólo producen vapor saturado. Son de bajo costo ya que su fabricación es sencilla y se utilizan para quemar combustibles gaseosos, líquidos y sólidos.

Las calderas pirotubulares son las más comunes en hospitales, hoteles, industrias medianas, etc. Dependiendo de la circulación de los gases por los tubos las hay de uno, dos, cuatro pasos.

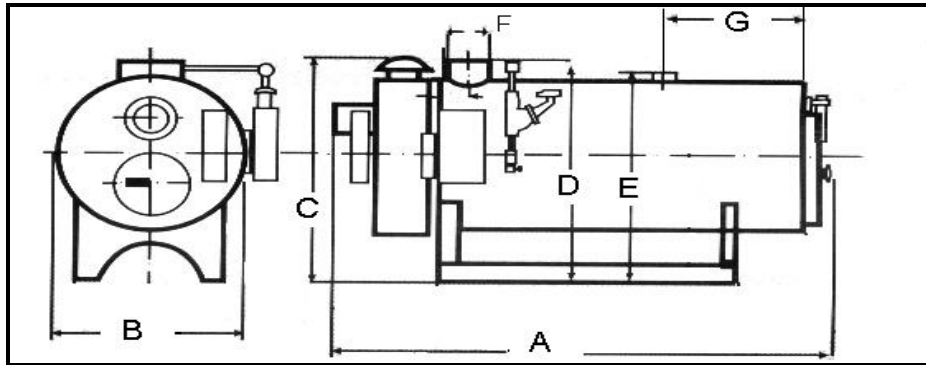
Los componentes básicos de una caldera pirotubular son:

1. Tambor principal
2. Placas de tubos
3. Tubos
4. Cámara de combustión
5. Quemador
6. Ventilador

El montaje de este tipo de caldera puede realizarse apoyando de los extremos del tambor sobre muros de ladrillo refractario o con el tambor suspendido de una estructura.

La principal característica con la cual se identifican estas calderas es con la capacidad en B.H.P (Boiler horse power) y se define como la potencia requerida para la evaporación de 34.5 lb de agua a 100 °C en vapor saturado a 100 °C, a la presión atmosférica normal de 14.7 Psig, cantidad que es igual a 33472 Btu/h. La siguiente tabla muestra las principales características técnicas de una caldera pirotubular.

Figura 2. Dimensiones de una caldera pirotubular



Fuente: Catalogo comercial Colmáquinas

Tabla 1. Características técnicas caldera horizontal, Presión de 150 Psig

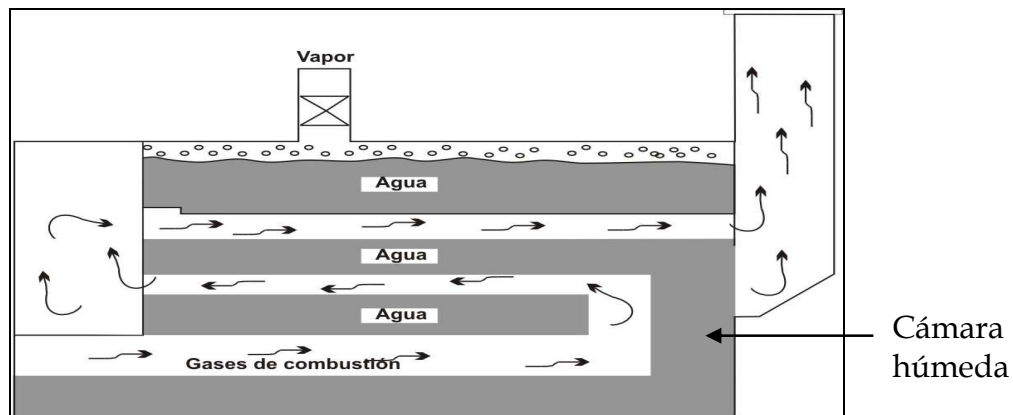
Capacidad en BHP	60	80	100	150	200	300
Superficie de calentamiento en in ²	200	300	500	750	1000	1500
Libras de vapor por hora a 212 °F	2070	2760	3450	5175	6900	10350
BTU – salida	2009	2678	3348	5021	6695	10043
Salida agua (1000 BTU/Hr. NET. MCA)	1605	2142	2911	4366	5825	8735
Contenido de agua de la caldera Lbs	1925	2920	5470	6215	8100	11598
Gas Natural CFH (1,000 BTU por ft ³)	2511	3348	4185	6276	8369	12553
Peso aproximado de embarque Lbs	4600	5250	8570	12840	15180	23910
Dimensiones						
A Longitud total	9'9"	12'10"	16'7"	17'6"	18'8"	19'8"
B Ancho sobre la cubierta	3'11"	3'11"	4'5"	4'11"	5'5"	6'5"
C Altura total	5'4"	5'4"	6'0"	6'6"	7'8"	9'1"
D Altura piso a salida de gases	5'3"	5'3"	5'9"	6'4"	6'8"	7'9"
E Altura piso a salida de vapor	5'3"	5'3"	5'9"	6'4"	6'11"	7'11"
F Salida gases diámetro nominal	12"	12"	12"	16"	16"	20"
G Salida de vapor localización	3'0"	3'0"	3'9"	6'0"	7'6"	8'0"

Fuente: Catalogo comercial Colmáquinas

▪ **Caldera Pirotubular con cámara húmeda.** Una caldera pirotubular con cámara húmeda (Wet Back), figura 3, se caracteriza por que la totalidad de la cámara de combustión se encuentra rodeada de agua, evitando recalentamiento

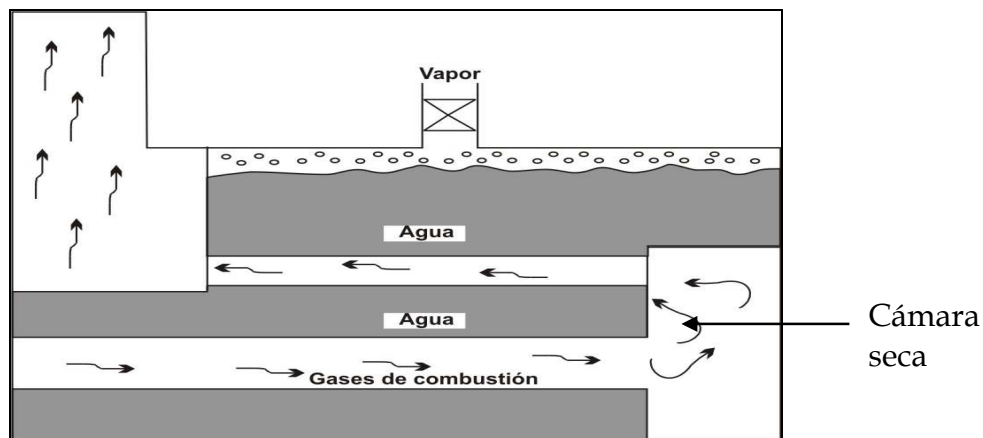
en su parte posterior. Son para combustibles gaseosos y líquidos, de dos o tres pasos.

Figura 3. Caldera pirotubular de cámara húmeda



▪ **Caldera Pirotubular con cámara seca.** Esta Caldera es similar en la construcción a la caldera con cámara húmeda, pero la diferencia es que la parte posterior se encuentra seca, es decir, no está rodeada de agua. La figura 4 muestra una caldera pirotubular con cámara seca, de este tipo es la caldera del laboratorio de plantas térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 4. Caldera pirotubular de cámara seca



➤ **Calderas Acuatubulares.** En este tipo de caldera los productos de combustión rodean a los tubos y el agua circula por el interior de los mismos, estos se conectan hacia un recipiente o domo en el punto más alto. Este tipo de caldera se utiliza en aplicaciones industriales, proporcionando capacidades hasta de diez millones de libras de vapor por hora, operando a presiones de diseño desde 100 Psig hasta 2500 o 4000 Psi, con temperaturas de vapor que varían desde la saturación hasta 540 °C.

La capacidad de estas calderas no se acostumbra a medir en BHP, normalmente se expresan en lb/hr de vapor producido o en MBtu/hr, teniendo en cuenta que cada libra de vapor a una presión y temperatura dadas dispone de una cantidad determinada de energía.

▪ **Componentes básicos de una caldera acuatubular.** Las calderas acuatubulares tienen los siguientes componentes básicos:

- Hogar
- Sección caldera
- Sobrecalentador
- Calentador de aire
- Economizador

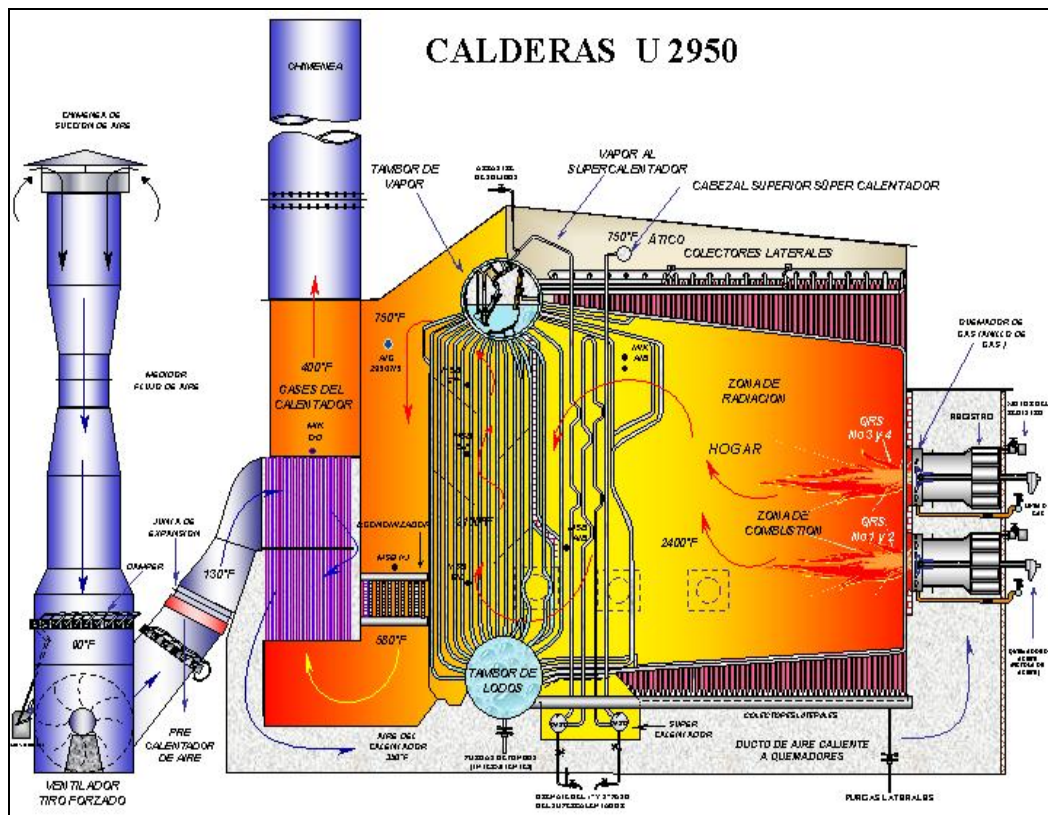
La figura 5 representa una caldera acuatubular con algunos de sus componentes.

* **Hogar.** Es el lugar en la caldera en donde, según el tipo de combustible ya sea líquido, sólido o gaseoso, este se mezcla con el aire y se quema, liberando calor. Es necesario que el tamaño del hogar sea suficiente para permitir la combustión adecuada, el tiempo adecuado para esta y la turbulencia posible para tener una combustión eficiente. Los hogares pueden ser de tipo refractario o del tipo enfriado por agua; los de tipo refractario son construidos en ladrillo refractario formando la envolvente del hogar; comúnmente están revestidos con un

aislamiento y un material de cubierta. Para el hogar de paredes enfriadas con agua, la envolvente consiste en tubos cercanos entre si, que absorben el calor y ayudan a la producción de vapor, estos hogares pueden tener paredes de tubos y enladrillado.

* **Sección de caldera.** (Sección de transferencia de calor por convección y radiación de la unidad) Son tubos cercanos entre si dispuestos para permitir el paso de los productos de combustión. La mayor parte de vapor se genera en esta parte de la caldera, si se requiere temperatura adicional del vapor, se instala un sobrecalentador.

Figura 5. Caldera acuatubular



Fuente: Cleaver Wilcox

* **Sobrecalentador.** En esta unidad, el vapor se dirige a través de los productos de combustión, para tomar calor adicional. Este calor adicional produce una

ganancia considerable de energía en el vapor que se libera en el uso final. Este uso podría ser una turbina de vapor u otro equipo que requiera liberación considerable de energía para su operación.

Cuando los tubos se localizan en la sección del hogar de la caldera recibiendo calor por radiación directa de la llama, se trata de un sobrecalentador de tipo radiante, mientras que los sobrecalentadores del tipo convectivo se localizan detrás de la pared pantalla de la sección caldera recibiendo su calor principalmente por el paso de los productos de combustión alrededor de los tubos.

* **Calentador de aire.** Es deseable, con frecuencia, precalentar el aire para la combustión antes de ponerlo en contacto con el combustible. Es necesario cuando se queman combustibles con alto contenido de humedad; se consigue captando el aire ambiente y se precalienta utilizando el calor sensible del gas de chimenea de la caldera que se está descargando de la unidad. Esto aumenta la eficiencia global y elimina el uso de combustible extra para este propósito; por lo tanto se recupera de calor.

* **Economizador.** Es un componente de caldera que precalienta el agua de alimentación con respecto a la temperatura de suministro, utilizando el calor sensible del gas de chimenea de la caldera que sale de la unidad, para disminuir el calor requerido para evaporar el agua y aumentar la eficiencia de la caldera.

▪ **Tipos de calderas acuatubulares.** De acuerdo a la circulación del vapor dentro de los tubos hay tres tipos de estas calderas, que son:

* **De circulación natural.** Es debida al mayor peso aportado por el agua de entrada contra la mezcla agua-vapor saturado. La presión máxima aceptable es de 2800 Psig.

* **De circulación controlada.** Para presiones hasta de 2850 Psig se consideran estas unidades que disponen en el circuito tambor de vapor-hogar bombas de baja diferencias de presión para obtener la circulación apropiada de la caldera.

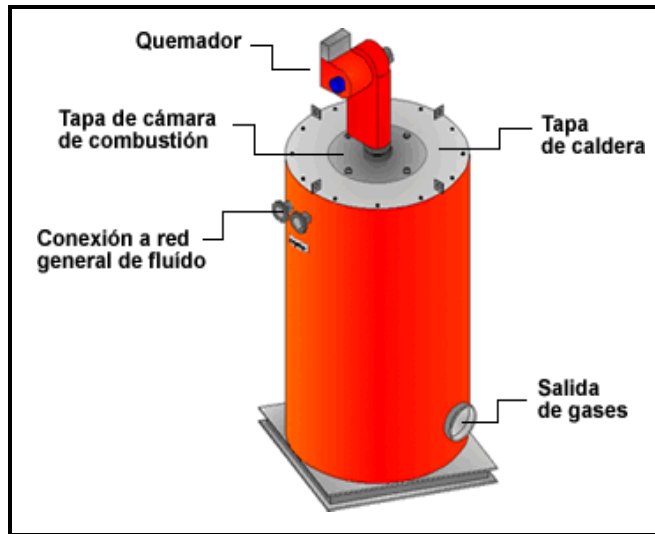
* **De circulación forzada.** El agua es forzada por un circuito que la va calentando hasta obtener el vapor a las condiciones de sobrecalentamiento requeridas. La bomba de alimentación tiene que suministrar la presión requerida para la operación como la caída del circuito.

1.2.3 Según la configuración. Según la disposición de los tubos podemos definir dos tipos de caldera.

➤ **Caldera Tipo Horizontal.** Se llaman así por la disposición horizontal de la tubería donde circulan los gases calientes producto de la combustión. Estas calderas se clasifican según el número de pasos, puede ser de 1 hasta 4 pasos según sea el número de veces que el humo recorra la longitud de la caldera. Entre mayor número de pasos más eficiente la unidad, pues se aprovecha en mayor parte, el calor de los humos. En la actualidad las calderas de mayor eficiencia son las de tres pasos, alcanzando eficiencias promedio del 90% según el fabricante. La figura 2 y la tabla 1 muestran las dimensiones principales.

➤ **Caldera Tipo Vertical.** Este tipo difiere de la anterior en la disposición de los tubos de los humos, Como su nombre lo indica están dispuestos verticalmente, este modelo de calderas comúnmente se fabrican de dos pasos en la industria y se utiliza comúnmente para pequeñas demandas de vapor.

Figura 6. Caldera pirotubular tipo vertical



1.3 COMBUSTIBLES PARA CALDERAS

Un combustible es una sustancia que reacciona químicamente con un agente oxidante y que puede ser utilizado para proporcionar energía calorífica por la oxidación rápida de sus elementos (Carbono, Hidrogeno y Azufre). Son generalmente mezclas cuya composición se puede dar en base molar o másica.

La propiedad más importante de cualquier combustible es su poder calorífico o calor desprendido por la combustión de una cantidad unitaria (masa o volumen) de combustible. Puede ser de dos tipos:

- *Poder calorífico superior (bruto) (HHV)*: considera el agua inicial del combustible y la formada en la combustión, en el estado líquido y la temperatura del ensayo; sus unidades son Btu/lb (Mj/Kg).
- *Poder calorífico inferior (neto) (LHV)*: se obtiene restando al poder calorífico superior el calor latente de agua presente al final de la combustión; sus unidades son Btu/lb (Mj/Kg) ó Btu/pe³ (Mj/m³).

El sistema ingles usa para cálculos de energía el poder calorífico superior y el sistema internacional usa el poder calorífico inferior.

Tabla 2. Poderes calóricos de algunos combustibles

COMBUSTIBLE	PODER CALIRÍFICO	UNIDAD
Gasolina	115.400	Btu/Galón
ACPM	138.000	Btu/Galón
Kerosene	134.000	Btu/Galón
Gas Propano	92.000	Btu/Galón
Gas natural	35.315	Btu/m ³
Fuel Oil	150.000	Btu/Galón
Carbón	11.900	Btu/pie ³

Fuente: Gas Natural S.A.

Una caldera puede quemar gran variedad de combustibles en diferentes fases, dependerá de los equipos de combustión utilizados. Los combustibles gaseosos se queman en quemadores de premezcla. Los combustibles líquidos deben incluir mecanismos para precalentar y luego gasificar el combustible. Para el quemado de combustibles sólidos los quemadores deben disponer de emparrillado (para ubicar el combustible) y un cenicero (para recoger las cenizas), el combustible debe calentarse para producir suficiente material volátil que inicie la combustión y un tiempo suficiente de residencia para completarla. Para operar a grandes ratas comparables con las de un gas o líquido, el combustible sólido debe pulverizarse.

1.3.1 Clasificación de los combustibles. Los combustibles se clasifican de acuerdo con la fase en que se encuentren en:

- Sólidos.
- Líquidos.
- Gaseosos.

➤ **Combustibles Sólidos.** Incluyen Carbón, desechos agroindustriales, bagazo, basura. El más utilizado es el carbón, que es una roca de origen orgánico; sus principales características se determinan en los análisis próximos que incluye la humedad, material volátil, cenizas, carbono fijo y se da en porcentajes máscicos, la tabla 3 se presenta una comparación promedio de los diferentes carbones de Colombia y sus elementos principales se dan en el análisis último que da la composición elemental del carbón: Carbono, Hidrogeno, Oxigeno, Nitrógeno y Azufre con contenido de cenizas y humedad libre. La tabla 4 muestra los principales elementos de diferentes tipos de carbones.

Tabla 3. Análisis próximo del carbones de Colombia

Parámetros	Cerrejón	Cundinamarca	Norte de Santander	Antioquia
Humedad (%)	9.2	9	9.0	8.8
Cenizas (%)	8.0	16.9	8.2	12.3
Volátiles (%)	34.9	26.3	35.7	36.4
HHV (Btu/lb)	11.900	11.200	12.500	9.800

Fuente: División de Análisis y Procesos del Carbón. Carbocol

Tabla 4. Análisis último de algunos tipos de carbón

Tipo de Carbón	% de humedad	Análisis último típico (seco), %					
		C	H	O	N	S	Ceniza
Antracita	7.7	83.7	1.9	2.3	0.9	0.7	10.5
Bituminoso	17.6	69.0	4.9	10.0	1.0	4.3	10.8
Lignito	37.7	60.3	4.9	16.2	1.0	1.2	10.4

Fuente: BABCOCK & WILCOX. Steam/its generation and use.

Sus características más relevantes son:

- *Humedad*: Cantidad de agua presente en el carbón y es la suma de la humedad inherente (humedad de equilibrio de una muestra de carbono expuesta al aire libre) y humedad libre (Es el exceso de la humedad de equilibrio). Para calderas el máximo de humedad total es 12%.
- *Material Volátil*: es el gas que se desprende de una muestra sin humedad, que se mantiene a 950 °C por 7 minutos, la diferencia en peso da el porcentaje de materias volátiles. La caldera acepta un amplio rango y de ellos depende la rapidez de encendido del carbón.
- *Cenizas*: Es el residuo no combustible que queda al quemar completamente el carbón; la caldera acepta un rango máximo que va de 12-18% dependiendo del tipo de caldera.
- *Carbón Fijo*: Es la diferencia entre la masa de la muestra original y la suma de las masas de agua, cenizas y materiales volátiles.

Los tipos de carbones se clasifican dependiendo de las edades químicas y geológicas, que marchan paralelamente; siendo el mas antiguo la antracita y el lignito el de mas reciente formación.

➤ **Combustibles Líquidos**. Los principales combustibles líquidos son derivados del petróleo, obtenidos por medio de procesos de refinación. Desde el punto de vista químico los derivados constituyen una mezcla de hidrocarburos que pueden ser: parafinica (hidrocarburos saturados en forma de cadenas), Naftenica (forma de anillos saturados), Olefinica (aceites vegetales) y Aromática (anillos saturados). Cada mezcla difiere en el contenido de hidrogeno y azufre, las predominantes son la parafinica y la naftenica. Una determinación cuantitativa por medios químicos no es práctica por la naturaleza propia de la mezcla.

Desde el punto de vista práctico solo interesa conocer los elementos y la proporción en que intervienen en la combustión, para ello se determinan ciertas propiedades físicas como:

- *Densidad*: Hay dos maneras de expresarla: la gravedad específica (γ) y se define como la relación entre el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura y la densidad API que se dan en grados y se relaciona con gravedad específica mediante:

$$\text{gradosAPI} = \frac{141.5}{\gamma} - 131.5$$

- *Viscosidad*: Es la medida de la resistencia interna de un líquido a fluir; desde el punto de vista del control de eficiencia de la combustión, la presencia de agua emulsificada (proveniente de condensados, escapes, acción bacteriana) incrementa la viscosidad del combustible.
- *Punto de Inflamación*: Es la temperatura mínima a la cual existen suficientes vapores de líquido, para crear una mezcla de aire y combustible que arda por algunos segundos en presencia de llama. Los combustibles para calderas tienen un punto de inflamación por encima de 79 °C;

Los combustibles líquidos más usados son:

- Fuel Oil N° 2 (ACPM): Es una fracción de la destilación en refinería primaria y es por lo tanto de fácil quemado.

- Fuel Oil No 6: Es combustible residual utilizado en quemadores de tipo industrial; lo más pesados requieren de precalentamiento para su manejo y atomización.

Sus principales características se aprecian en la tabla 5.

Tabla 5. Características típicas de combustibles colombianos para calderas

Características	Kerosene	ACPM	Fuel Oil No. 6
Gravedad API	37.9	30	2.5
Azufre, % Peso	0.141	0.5	
Cenizas, % Peso	0.0	0.0	
BSW, % Vol		0.1	
Pto. Fluidez °F		29.3	
Pto. Inflamación (°F)	149	208	140
Carbón canradson % peso			
Agua y sedm. %vol			2.0
Destilación (°F), Inc.		453	
50%		572	
Pto. Final		661	

Fuente: ECOPETROL, Departamento de Ingeniería de Procesos

➤ **Combustibles Gaseosos.** Los principales combustibles gaseosos son el gas natural, el gas de alto horno, gas de hornos de coque y los gases de petróleo (propano y butano). Los combustibles gaseosos son los que mayor facilidad ofrecen para la combustión puesto que solo requiere mezclarlos con el aire, siendo la combustion muy limpia y sin problemas de operación. Su principal limitación es el almacenamiento de grandes cantidades porque no es factible, ni física ni económicamente.

El gas natural es un gas casi inoloro e incoloro que contiene hidrocarburos gaseosos de C_1 a C_4 que se acumula en la parte superior de pozos petrolíferos y gasíferos; en la actualidad es el más apetecido para la generación de vapor, es una mezcla de metano, otros hidrocarburos y gases no combustibles como vapor de agua, gases de azufre y helio.

Las propiedades del gas natural y su composición la deben conocer diseñadores y operadores de planta; las mas importantes son: la cantidad, el flujo, presión, temperatura, puntos de roció, peso molecular, densidad, y poder calorífico.

Algunas características promedio del gas combustible son:

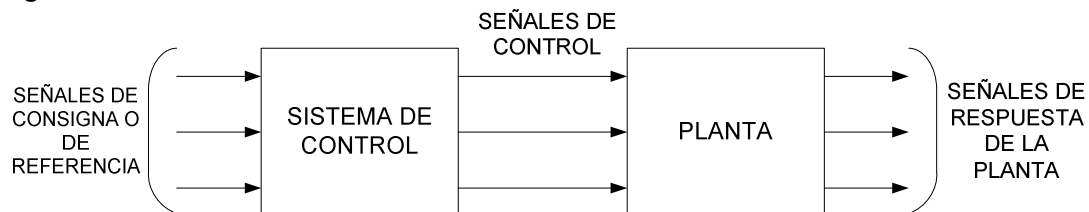
- Poder calorífico 35.315-44.143 Btu/m³ (1000-1250Btu/pie³).
- Densidad relativa=0.5-0.8.
- Limite de inflamabilidad=4.15%.
- Sulfuro de hidrogeno menos de 5 ppm.

2. GENERALIDADES Y DISPOSITIVOS DE CONTROL

La función del control se define como la manipulación indirecta (sin intervención humana) de las magnitudes de un sistema llamado planta a través de otro sistema llamado sistema de control.

Un sistema de control es el que gobierna la respuesta de una planta, sin que el operador intervenga directamente sobre sus elementos de salida, este solo manipula magnitudes de consigna (valores deseados) y el sistema de control se encarga de que las salidas sean las deseadas mediante la manipulación de los accionamientos, es decir, compara el valor de una variable a controlar con un valor de referencia y cuando existe una desviación, efectúa una corrección sin que exista la intervención humana, ver figura 7.

Figura 7. Sistema de control



El objetivo de un sistema de control automático es ajustar la variable manipulada para mantener la variable regulada en el valor deseado (estipulado) en un punto de referencia aun en presencia de perturbaciones.

El control es importante por que:

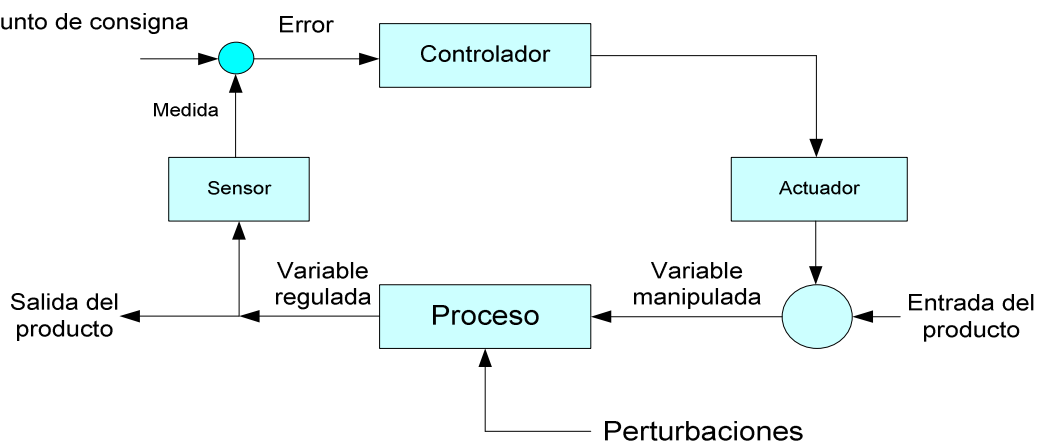
- Previene riesgos para el personal de la planta.

- Protege el medio ambiente, previniendo las emisiones y minimizando derrames.
- Previene daños en los equipos.
- Mantiene la calidad del producto (composición, pureza, estado, presión).
- Mantiene la tasa d producción al mínimo costo.

En términos generales el sistema de control es el dispositivo encargado de realizar el control coordinador de las distintas operaciones encaminadas a mantener la parte operativa (dispositivos, maquinas o subprocesos, diseñados para realizar determinada función) bajo un determinado funcionamiento preestablecido por el proceso o por el operario.

Un sistema o lazo de control elemental se puede ver en un diagrama de bloques (figura 8) y consiste de un controlador automático, un actuador, un proceso y un sensor (elemento de medición). El controlador detecta la señal de error, que es por lo general de potencia muy baja y la amplifica al nivel deseado, la salida del controlador alimenta al actuador (motor hidráulico o eléctrico, una servo válvula) que produce una entrada a la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal de salida de la planta se aproxime a la señal de entrada de referencia.

Figura 8. Lazo de control



El desarrollo de los dispositivos de control (hardware y software), su complejidad y eficacia, han ido asociados al desarrollo tecnológico experimentado a lo largo de los tiempos. Los dispositivos de control más comunes son: los reguladores industriales, los autómatas programables (PLC), las computadoras industriales (IPC), los microcontroladores y el control industrial basado en PC.

2.1 CONCEPTOS SOBRE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

Se definen algunos conceptos que se utilizan en el libro.

Variable Regulada (controlada) o de proceso. Es la variable que tiene que ser mantenida en un valor deseado.

Variable de referencia: Es el valor en el cual se desea mantener la variable regulada.

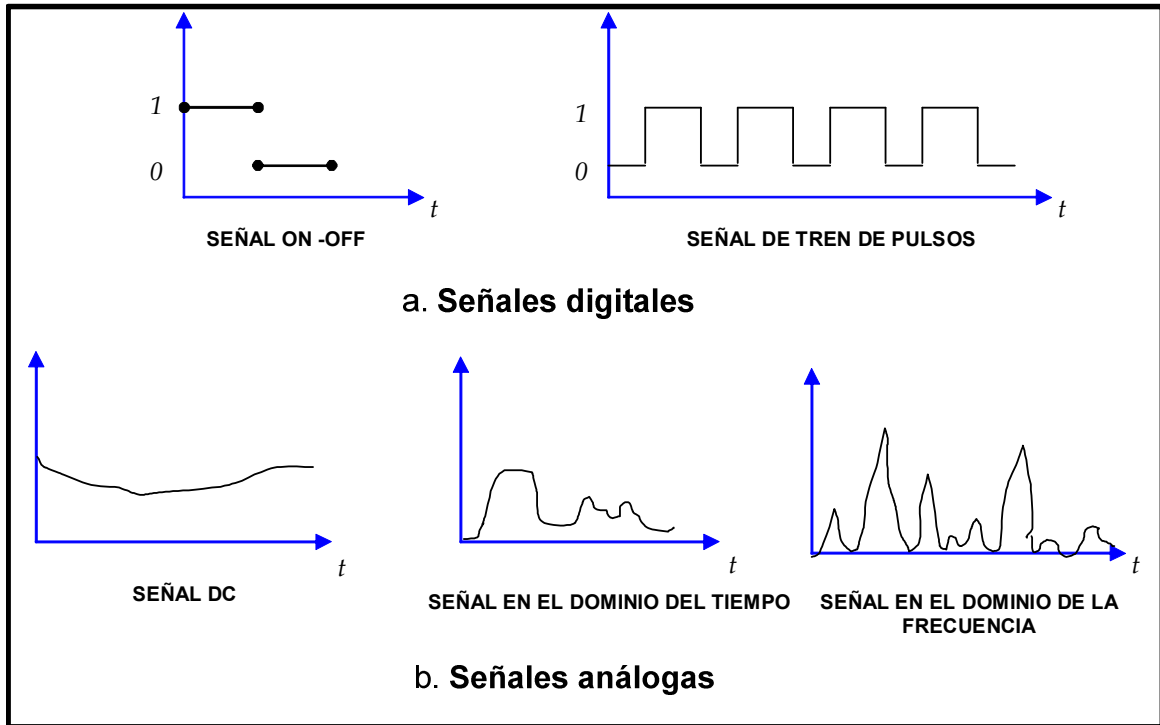
Variable Manipulada: Variable usada para mantener la variable regulada en el valor referencia estipulado.

Proceso: Sistema desarrollado para llevar a cumplir un objetivo determinado, tratamiento de la sustancia o producto de trabajo mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación.

Señal: es una magnitud de baja potencia, que conecta un lazo de control. Se clasifican en señales análogas (que toma valores continuos) o digitales (que toma valores discretos). Existen tres tipos de señales análogas: la señal DC, la señal dominio en el tiempo y la señal en dominio de frecuencia y dos tipos de señales digitales: la señal on – off y la señal de tren de pulsos.

Cada tipo de señal es única en la información que contiene y depende de la característica de la señal a ser medida. Los tipos de información en las señales son: nivel, forma, contenido espectral (frecuencial), estado y flujo. La figura 9 muestra los diferentes tipos de señales análogas y digitales.

Figura 9. Tipos de señales. a) Digitales b) Análogas



Accionadores o actuadores. Dispositivos que actúan sobre la parte operativa de la planta. La potencia necesaria para actuar sobre los accionamientos puede ser considerable y, a veces, no puede ser suministrada por la parte de control. En tales casos, se requiere de unos elementos intermedios encargados de interpretar las señales de control y actuar sobre la parte de potencia propiamente dicha. Dichos elementos se denominan habitualmente preactuadores, y permiten manejar mayores niveles de potencia, y así suministrar la potencia requerida por los accionadores conectados en la parte operativa.

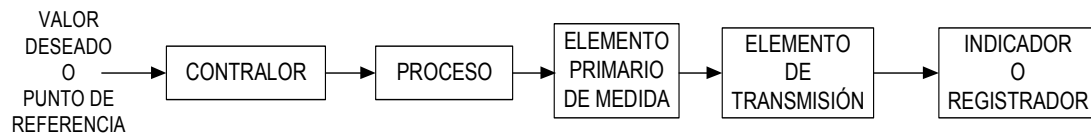
2.2 SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control según sean correctivos o no se clasifican en:

- Sistemas de control de lazo abierto.
- Sistemas de control de lazo cerrado.

2.2.1 Sistema de control de lazo abierto. La figura 10 muestra un *sistema de control de lazo abierto*, donde no hay señal de retroalimentación, la acción de control es independiente de la salida y la salida se ajusta manualmente.

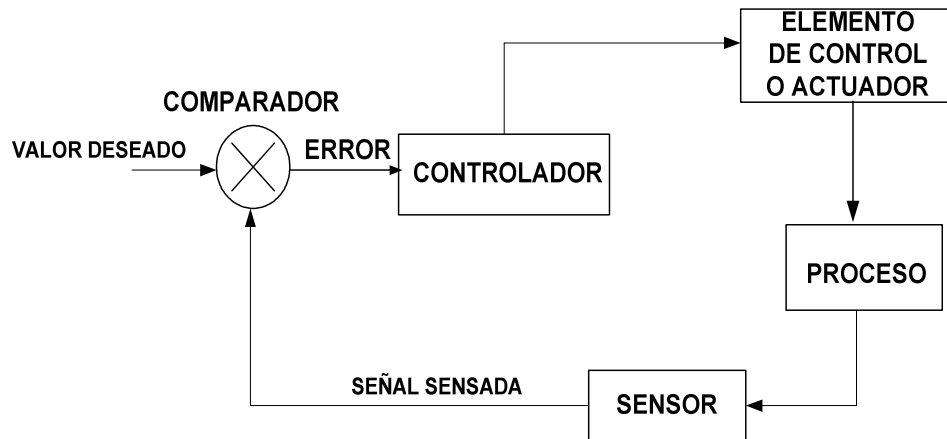
Figura 10. Sistema de control de lazo abierto



La exactitud de la acción que ejecuta esta determinada por su calibración, es decir, por la relación de exactitud establecida entre la entrada y la salida. Un sistema de control de lazo abierto alcanza el punto de referencia, pero no está en capacidad de responder a las perturbaciones que presente el proceso que controla.

2.2.2 Sistema de control de lazo cerrado. El *sistema de control de lazo cerrado*, es aquel, que compara permanentemente la señal de retroalimentación con una señal de referencia, para generar una señal error que corrija cualquier diferencia entre estas señales de manera automática, buscando que esta se reduzca a cero o casi cero. El sistema de lazo cerrado se muestra en la gráfica 11.

Figura 11. Sistema de control de lazo cerrado



En todo lazo de control cerrado se realizan tres operaciones básicas, y siempre deben estar presentes. Estas son:

Medición: la medición de la variable que debe ser controlada es realizada usualmente por la combinación de sensor y transmisor. En muchos casos no se requiere que la señal del sensor pase por el transmisor.

Decisión: con base en lo medido, el controlador decide que hacer para mantener la variable controlada en su valor deseado.

Actuación: es el resultado de la decisión del controlador; el sistema debe realizar una acción a través del elemento final de control (actuador).

2.3 ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL.

Para realizar una estrategia de control se debe conocer las acciones básicas que suelen usar los controladores automáticos industriales. Como son:

- De dos posiciones (on-off, encendido-apagado).

- Proporcional (P).
- Proporcional integral (PI).
- Proporcional derivativo (PD).
- Proporcional integral derivativo (PID).

➤ **De dos posiciones (on-off):** en este modo de control el elemento accionador tiene solamente dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente encendido o apagado, está no está. Es relativamente simple y económico.

➤ **Acción Proporcional:** con esta acción el sistema controlado tiene un rango continuo de posiciones posibles. La salida del controlador es proporcional a la señal de error.

➤ **Acción Integral:** esta acción ajusta el desbalance (error) de la acción de control proporcional. Toma el desbalance y, a medida que pasa el tiempo, ajusta el elemento de control en la dirección en la que se reduce el desbalance hasta que se reduzca a cero.

➤ **Acción Derivativa:** la acción derivativa trata de adelantarse a los cambios que sufrirá el proceso por acción proporcional e integral, es decir, acelera la respuesta produciendo una estabilidad de la variable manipulada.

➤ **Proporcional integral derivativo (PID):** este modo de control posee infinitas posiciones y aprovecha las ventajas de la combinación de los efectos de la acción

proporcional, la acción integral y la acción derivativa. La ecuación diferencial para un controlador con acción PID es:

$$u_{(t)} = k_p e_{(t)} + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e_{(t)} dt + k_p T_d \frac{de_{(t)}}{dt} \quad (2.1)$$

En donde $u_{(t)}$ salida de controlador, K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral, $e_{(t)}$ es el error en el tiempo y T_d es el tiempo derivativo.

2.4 DISPOSITIVOS DE CONTROL

El tipo de dispositivo de control que se use debe decidirse con base en la naturaleza de la planta y en las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

Su selección y aplicación se rigen por la complejidad, eficiencia y costo para un determinado sistema o proceso.

Las funciones de los dispositivos de control más comunes son:

- Gestión de las entradas y salidas
- Operaciones de supervisión (monitorización y diagnóstico de fallas).
- Tratamiento de ecuaciones lógicas
- Seguimiento de la producción
- Funciones de regulación
- Control de calidad.

2.4.1 Clasificación de los dispositivos de control. Para conocer y analizar los dispositivos de control, estos se clasifican de acuerdo con los siguientes criterios:

- Técnicas de control
- Tipo de señal a la salida del controlador
- Tecnología del controlador.

➤ **Según las técnicas de control.** El termino planta o proceso se utiliza para describir la parte del sistema que se controla, ya que esta generalmente muestra las propiedades inherentes que no se pueden alterar por el diseñador y se caracterizan típicamente como dinámicas y continuas. Las acciones de planta son dinámicas en el sentido que existe almacenamiento de energía dentro de la planta y el comportamiento es dependiente de las excitaciones pasadas y presentes; y son continuas porque aunque se pueden muestrear a intervalos de tiempo prudente, las variables son claramente observables como señales continuas.

Con tecnologías que cambian rápidamente es difícil intentar clasificar las técnicas de control, pero se puede realizar una clasificación de acuerdo a cómo se perciben generalmente, esta clasificación es la siguiente:

- Sistemas de control continuo (a veces denominado control analógico)
- Sistemas de control digital utilizando datos muestreados
- Sistemas que utilizan acciones discretas que dependen de sucesos discretos (control de eventos discretos).

▪ **Control continuo.** Es aquel que opera con señales continuas. Los accionadores utilizan componentes electromecánicos, neumáticos, etc., pero la

función de control es implementada, la mayoría de veces, utilizando circuitos electrónicos cableados, por ejemplo los amplificadores operacionales. Estos operan en tiempo real con cálculo paralelo. Algunas de las variaciones en la información de control en controladores analógicos se deben a variaciones térmicas, envejecimiento de los componentes o a la presencia de diversas formas de ruido.

En el lazo de control, el controlador utiliza amplificadores operacionales.

▪ **Control digital con datos muestreados.** Operan sobre plantas continuas, virtualizando las operaciones que se necesitan para obtener una acción sobre la variable manipulada. Se requiere una conversión digital-análoga (D/A) entre el controlador y la planta y alguna forma de conversión análoga-digital (A/D) en relación con la medida de las variables de la planta.

Se denomina de datos muestreados porque el controlador digital no puede estar *continuamente* convirtiendo las señales de los sensores, procesando y actuando; solo lo puede realizar muestreos a intervalos regulares de tiempo.

Con esta combinación de acciones discretas y continuas, los componentes digitales, generan a algunos retardos no deseados en los tiempos de conversión, en el manejo de los datos y en el calculo estructurado de forma secuencial, por lo que se afecta la estabilidad dinámica de la planta; pero se obtienen mejoras en cuanto a inmunidad al ruido y a la variación de los componentes, no se genera variación en la información a menos que las perturbaciones sean muy grandes, posee mayor capacidad para retener y manejar datos y para operaciones matemáticas.

En el lazo de control el controlador utilizado es un controlador digital programable (autómata programable).

▪ **Control de eventos discretos.** El control de eventos discretos es algunas veces denominado control secuencial o control lógico programable y como, al menos una parte de la aplicación es dinámica, se conoce también como control dinámico de eventos discretos. Las condiciones de entrada y de realimentación que recibe el controlador son señales binarias y las acciones enviadas por el controlador a la planta también lo son. Utiliza para el control, actuadores on-off, es decir, define solamente dos niveles discretos o estados que están bien definidos en el proceso: apagado/encendido.

➤ **Según el tipo de señal a la salida del controlador.** Esta clasificación depende exclusivamente del elemento final de control (actuador) que el controlador debe accionar. Pueden ser:

- De acción continua
- De acción escalonada
- De pulsos.

▪ **Acción continua.** La señal de salida del controlador hacia el actuador puede ser cualquier valor dentro de un rango establecido, siendo esta señal de tipo análogo. Un controlador de acción continua mantiene una señal una señal hacia el actuador aún si esta ha sido completamente eliminado el error y se requiere cuando el actuador debe tener una señal permanente. Por ejemplo, una señal de voltaje aplicada permanentemente a una servo válvula

▪ **De acción escalonada.** Tiene tres posiciones. Hacia delante – parada – reversa. Un controlador de este tipo es usado para conducir un actuador que requiera de energización solo cuando deba reposicionarse.

▪ **De pulsos.** Cuando se usa este controlador la señal continua de salida es convertida a una señal pulsante (de pulsos). La respuesta del controlador es determinada por el ancho del pulso y su frecuencia.

➤ **Según la tecnología del controlador.** El desarrollo de los dispositivos de control (hardware y software), su complejidad y eficacia, ha ido asociado al desarrollo tecnológico experimentado a lo largo de los tiempos, de acuerdo a este los dispositivos de control se clasifican en:

- Automatismos cableados
- Automatismos programados

▪ **Automatismos cableados.** El controlador de los automatismos cableados realiza una función de control fija, que depende de los componentes que lo conforman y de la forma (física) en que se han interconectado; para modificar su función de control deben cambiarse sus componentes o la forma de interconectarlos físicamente. Según los elementos que intervienen en la implementación de su controlador los hay mecánicos, neumáticos, fluídicos eléctricos y electrónicos.

Frente a los automatismos con lógica programada, presentan los siguientes inconvenientes:

- Imposibilidad de realizar funciones complejas de control.
- Gran volumen y peso.
- Escasa flexibilidad frente a las modificaciones.
- Reparaciones costosas.

■ **Automatismos Programados.** Su principal ventaja es que el controlador utilizado en los automatismos programados puede realizar distintas funciones de control sin alterar su configuración, solo se cambia su programa de control. Utiliza tecnología de microcontroladores y de los sistemas programables basados en este: computador, controladores lógicos y autómatas programables.

Frente a los automatismos cableados tiene las siguientes ventajas:

- Gran flexibilidad de control.
- Posibilidad de cálculo científico e implementación de algoritmos complejos de control de procesos.
- Arquitectura de control distribuido.
- Calidad, Comunicaciones con el entorno de trabajo.

Sus desventajas a corto y mediano plazo son: que requieren atención por personal adecuado y, presentan vulnerabilidad frente a condiciones agresivas del medio industrial.

Los dispositivos de control programable más comunes son: los autómatas programables (PLC), controladores industriales, las computadoras industriales (IPC), microcontroladores y el control industrial basado en PC.

- **Autómatas Programables (PLC).** Un autómata programable es un dispositivo de control (hardware) que se adapta a un proceso mediante un programa

específico (software), que contiene la secuencia de las operaciones a realizar. Esta secuencia de operaciones se define sobre las señales de entrada y salida al proceso, conectadas directamente en los bornes de conexión del autómata. ver figura 12.

Figura 12. Autómata programable



Las señales de entrada pueden proceder de elementos digitales y analógicos. Las señales de salidas son órdenes digitales todo o nada, o señales analógicas en tensión o corriente, que se envían a los actuadores del proceso.

Los autómatas programables son dispositivos secuenciales que ejecutan correlativamente las instrucciones indicadas en el programa del usuario almacenado en una memoria, generando unas órdenes o señales de mando a partir de las señales de entrada leídas del proceso; al detectar cambio en las señales, el autómata reacciona según el programa hasta obtener las órdenes de salida necesarias. Esta secuencia se ejecuta continuamente para conseguir el control actualizado del proceso.

Todas estas acciones se repiten periódicamente, generando un ciclo de operación que necesita de un cierto tiempo para ser ejecutado. Este tiempo será determinante cuando el autómata pretenda controlar procesos rápidos, con señales de muy corta duración o alta frecuencia de conmutación.

* **Reguladores o controladores industriales.** Un regulador (figura 13) está concebido para generar una salida capaz de causar un efecto correctivo sobre la variable de proceso controlada para llevarla hacia un valor deseado llamado consigna. Esto se consigue mediante la comparación de la consigna con el valor real y la diferencia de estas dos magnitudes (error de regulación) es la base a partir de la cual actúa el control. Aquí se ve la necesidad de medir el valor real de la variable controlada, por ésta razón el sensor es un elemento crítico del sistema y cuando se compra se debe tener en cuenta que es la clave para poder realizar un buen control. De la misma manera, también se debe pensar en la instalación, especialmente en la forma en que se transmite los datos del sensor hacia el regulador y posibles fuentes de interferencias.

Figura 13. Controlador industrial



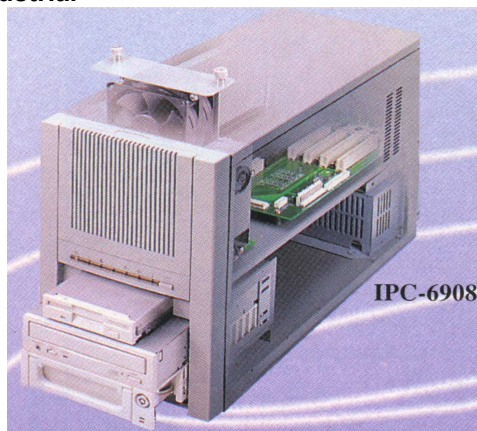
A pesar de la dura competencia que sufren por parte de los otros dispositivos de control, los reguladores industriales siguen siendo una opción muy válida para controlar variables como la temperatura, caudal, nivel o presión gracias a que se han especializado tanto en sus algoritmos de control como en sus capacidades de comunicación con el entorno.

* **Computadoras Industriales.** Un computador industrial puede definirse como un sistema basado en un ordenador industrial configurable por el usuario, capaz de

realizar múltiples funciones de supervisión, control, monitorización de la producción, manejo de alarmas y coordinación de aparatos.

El computador industrial utilizado como controlador deberá realizar con total normalidad las funciones encomendadas, dentro de un entorno severo de trabajo como es el industrial, al hacer correr sobre él un programa de software de control generalmente adaptado a las necesidades del usuario. En un entorno industrial, el computador industrial cumple las exigencias de un alto grado de seguridad (polvo, agua, interferencias electromagnéticas), accesibilidad y posibilidades de comunicarse con la red de automatización en la que estará incorporado.

Figura 14. Computador industrial



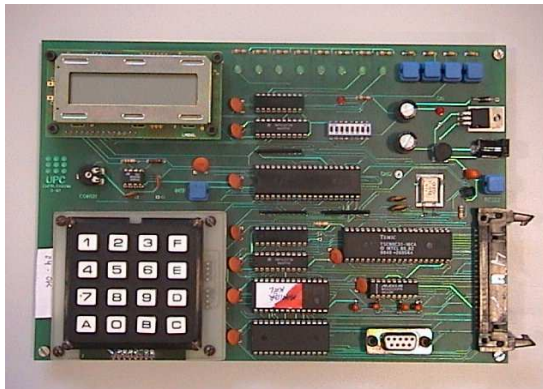
Fuente: IBM

Si observamos el entorno de un dispositivo de control industrial, podemos constatar que éste trabaja junto a gran cantidad de equipos electrónicos, sensores y accionadores, lo que dificulta la comunicación entre ellos. Por tanto, todas estas diferentes tareas de comunicación no pueden ser llevadas a cabo con cualquier hardware, software y red de comunicación, sino que es preciso una cuidadosa configuración del sistema de comunicación mediante redes que comuniquen todos los componentes, y es precisamente en este ámbito de aplicación donde están siendo utilizados cada vez más los computadores industriales (IPC). En conclusión, los computadores industriales, mejoran la capacidad de monitoreo,

incrementan la velocidad y el almacenamiento de datos; éstas son algunas de las virtudes que ofrecen las últimas generaciones de los IPC.

* **Microcontroladores.** Un microcontrolador es un dispositivo electrónico capaz de llevar a cabo procesos lógicos que incluye en su interior las tres unidades funcionales de un ordenador: CPU, memoria y unidades de E/S, es decir, se trata de un computador monopastilla, aunque de limitadas prestaciones y que normalmente se dedica a resolver una tarea específica. La implementación del sistema de control basado en microcontroladores se parece al planteado con el autómata.

Figura 15. Microcontrolador



* **Control Industrial basado en PC.** Dado que una solución basada en PC es fundamentalmente una solución basada en software, el primer elemento a considerar es el motor del software de control, es decir, el programa de software diseñado para controlar una operación. El sistema operativo más apropiado ha sido objeto de muchos debates entre los proveedores de software, ya que el sistema operativo debe estar diseñado para el control del hardware en tiempo real.

Al hablar genéricamente de un PC, en realidad se incluyendo equipos de muy diversas características o precios; por tanto, otra decisión por tomar es el tipo de hardware (un computador de calidad comercial o un computador industrial). El computador de calidad comercial se puede adquirir a un bajo precio; para el caso de un computador industrial su costo puede ser sensiblemente elevado ya que tiene un blindaje que puede soportar el ambiente industrial.

Las ventajas para optar por las soluciones basadas en PC se refieren a las mejoras que proporcionan en cuanto a la flexibilidad, conectividad y acceso a la información. Los sistemas basados en PC son fácilmente ampliables y su configuración en redes de comunicación se puede realizar a bajo costo.

Igualmente, la capacidad del PC para operar con un elevado nivel de información lo convierte en una herramienta ideal para aplicaciones que impliquen grandes volúmenes de información y control. Por otra parte, la creciente utilización de dispositivos de red, proporciona cada vez mayor caudal de información de la planta, susceptibles de operar con tecnología de sistemas abiertos disponibles, que permiten conectar fácilmente a los computadores entre si, y a éstos, con los procesos de planta.

Un sistema de control basado en PC necesita, para su ejecución, un mecanismo (hardware) que le permita intercambiar datos entre el proceso y el computador, ese mecanismo puede ser:

- Sistema modular distribuido basado en PC (Fieldpoint)
- Tarjetas de adquisición de datos.

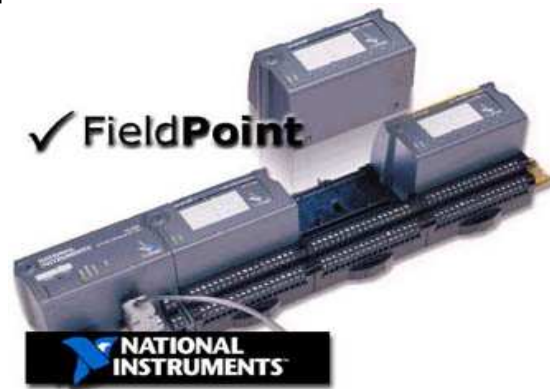
- **Sistema modular distribuido basado en PC (Fieldpoint).** Este es un sistema distribuido modular de E/S basado en PC con desempeño de grado industrial y integración total de software, incluye una variedad de módulos aislados de E/S

analógicas y digitales, bases terminales e interfases de red que se conecta con el computador a través del puerto serial RS-232.

El beneficio más obvio para las E/S distribuidas a escala industrial es el ahorro en cableado, pues se usa un simple cable de red de bajo costo que puede ahorrar tiempo significativo y dinero, durante la instalación y mantenimiento.

Adicionalmente, evita los problemas de interferencia de ruido que ocurren al usar cableado de señales análogas de larga distancia.

Figura 16. Sistema fieldpoint

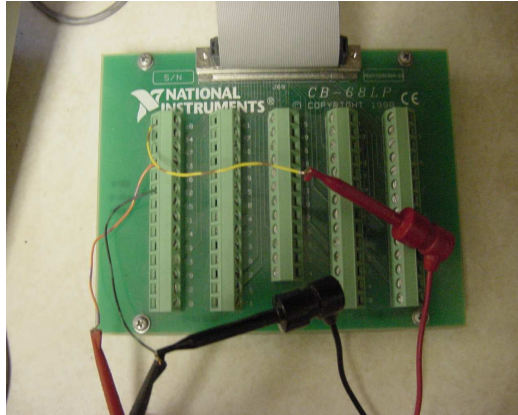


Fuente: National Instruments

Los módulos FieldPoint presentan unas ventajas con respecto a otros productos del mismo tipo, ya que la proliferación de redes industriales abiertas se ha hecho más fácil la adquisición de datos y funciones de control fuera del campo. Usando tecnología de red robusta para posicionar aparatos inteligentes de E/S distribuidas más cerca de los sensores, procesos o unidades bajo prueba, se pueden obtener ahorros significativos de costos y mejoras en el desempeño.

- **Tarjetas de adquisición de datos.** Cumplen la misma función que el Fieldpoint pero dejan de ser un sistema distribuido modular y se convierten en tarjetas especiales para cada tipo de señal en particular.

Figura 17. Tarjeta de adquisición de datos



Fuente: National Instruments

A su vez, para intercambiar datos se necesita de un componente software que realice las operaciones programables de los procesos de transferencia de información; fabricantes como National Instrument suministran el software (Labview), o este puede ser realizado por el usuario en lenguajes estándar como DELPHI.

3. SISTEMAS BÁSICOS DE UNA CALDERA PIROTUBULAR

Debido a la importancia que tiene para los estudiantes de ingeniería mecánica, el conocimiento de los equipos con que cuentan, este capítulo presenta un estudio detallado de los sistemas que conforman la caldera del laboratorio de plantas térmicas. Este capítulo incluye entre otros temas, los sistemas que la conforman, los equipos principales y su funcionamiento, estrategias de control, funcionamiento en general. El estudio de los sistemas presentes en la caldera deja sentadas las bases para el entendimiento y la realización de los objetivos trazados en este proyecto.

Las especificaciones de la caldera se muestran en la tabla 6 siguiente:

Tabla 6. Especificaciones de la Caldera Pirotubular del Laboratorio de plantas térmicas de la escuela de Ingeniería Mecánica de la universidad Industrial de Santander

Clase	Pirotubular	Serie	A-2686
Marca	Colmaquinas	Consumo de Combustible	14,4 m ³ /h a 40 psi
Pasos	2	Tipo de Circulación	Natural
Combustible	Gas natural	Generación Calorífica	669 500 BTU/H
Quemador	56-6	Presión de Diseño	150 psi
Capacidad	20 BHP	Presión de Trabajo	120 psi
Modelo	Ch-20150	Posición Tubos	Horizontal

Fuente: Colmáquinas

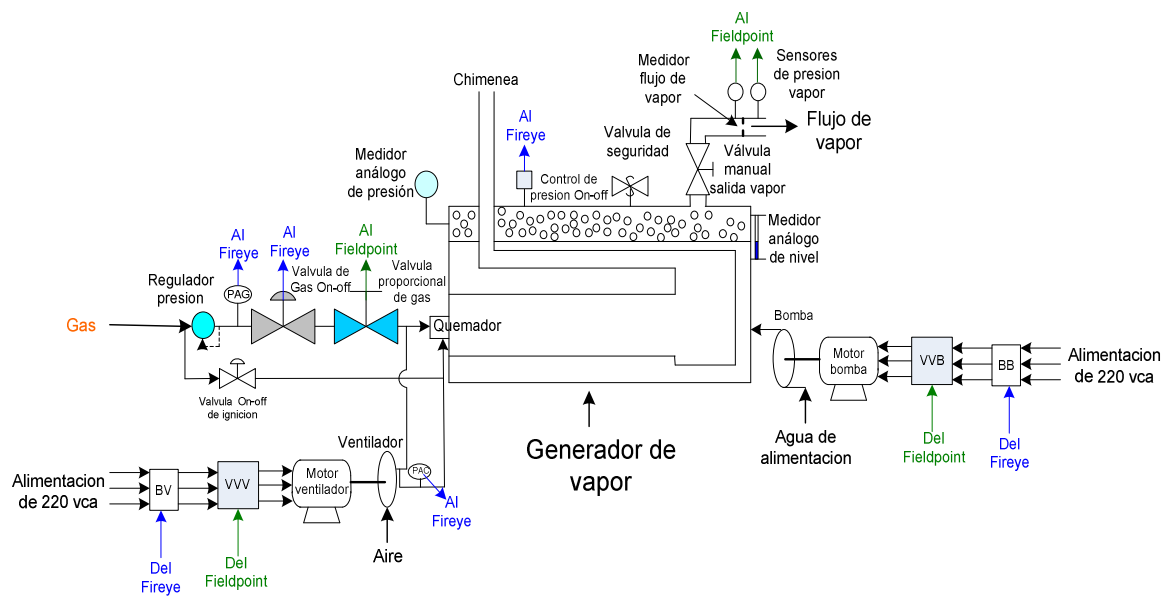
Para conocer y entender como la caldera convierte agua en vapor a través del calor entregado por un combustible, se puede definir algunos sistemas básicos. Desde su aporte funcional los sistemas más importantes en una caldera son:

- Sistema de Combustión
- Sistema de agua

- Sistema de control y monitoreo.

Un sistema es un conjunto de equipos funcionales y de control, instalados para la ejecución de un proceso específico. Cada uno de estos sistemas cumple con una función determinada y no hay distinción en importancia pues todos ayudan a la consecución del objetivo general, la producción de vapor. La producción de vapor se realiza de acuerdo con la interacción de los diferentes sistemas que conforman el proceso, los cuales aseguran una operación continua, automática, segura y económica.

Figura 18. Esquema general de la caldera



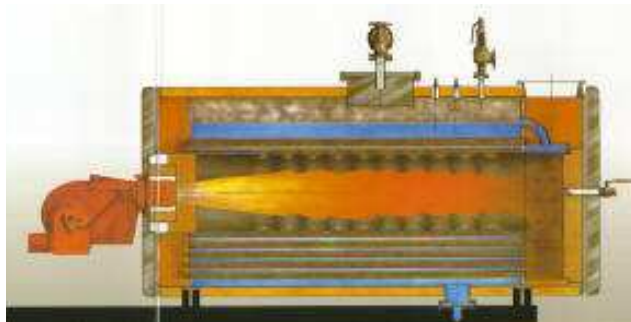
La figura 18 es un esquema general de los sistemas instalados en la caldera del laboratorio de plantas térmicas de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS; el suministro de gas y aire conforman el sistema de combustión, el agua de alimentación y el vapor producido conforman el sistema de agua y los sensores de presión, los actuadores: motor del ventilador y de la bomba (MV y MB), variadores de velocidad del ventilador y de la bomba (VAV y VVB) son algunos elementos del

sistema de control. Muestra además algunos otros componentes de cada sistema, que serán explicados mas adelante.

3.1. SISTEMA DE COMBUSTIÓN

Básicamente la combustión es el proceso de quemar un combustible. En términos químicos se refiere a la oxidación rápida de una sustancia (combustible), acompañada por calor y usualmente luz, en términos prácticos es la combinación rápida del oxígeno del aire con un combustible (gas natural, carbón, A.C.P.M. fuel oil), resultando una liberación de calor.

Figura 19. Combustión en una caldera pirotubular



La combustión puede ser *perfecta* cuando todo el combustible es quemado, utilizando solamente la cantidad de aire teórico; *completa* cuando todo el combustible es quemado utilizando una cantidad mínima (exceso de aire) por encima de la cantidad de aire teórico o *incompleta*, que ocurre cuando no todo el combustible se quema. En una caldera la combustión perfecta no puede llevarse a cabo, puesto que siempre se da la combustión completa.

El oxígeno de la combustión proviene normalmente del aire, donde se encuentra en una proporción de un 21% del volumen total, el 79% restante, es en mayor parte nitrógeno.

Todo proceso de combustión requiere mantener un correcto balance de la proporción aire – combustible, para evitar explosiones por exceso de gas, pérdida de eficiencia por presencia de combustible a la salida de la chimenea que disminuye la temperatura sobre la llama y aumento de contaminación atmosférica por presencia de gases contaminantes como CO, SO₂, SO₃, NO y NO₂.

La tabla 7 muestra valores recomendados de exceso de aire y otros parámetros para diferentes carburantes.

Tabla 7. Nivel recomendado de exceso de aire y otros parámetros

Combustible	Parámetro			
	Exceso aire (%)	O ₂ en chimenea (%)	CO en chimenea (ppm)	Opacidad de humos ³ (Indice Bacharach)
Gas natural	10 máx.	2.0 máx.	50 máx.	0
Diesel	20 máx.	3.5 máx.	200 máx.	3 máximo
Residual	25 máx.	4.0 máx.	400 máx.	4 máximo

3.1.1 Subsistemas del sistema de combustión. El sistema de combustión para la caldera esta compuesto por dos subsistemas, que son:

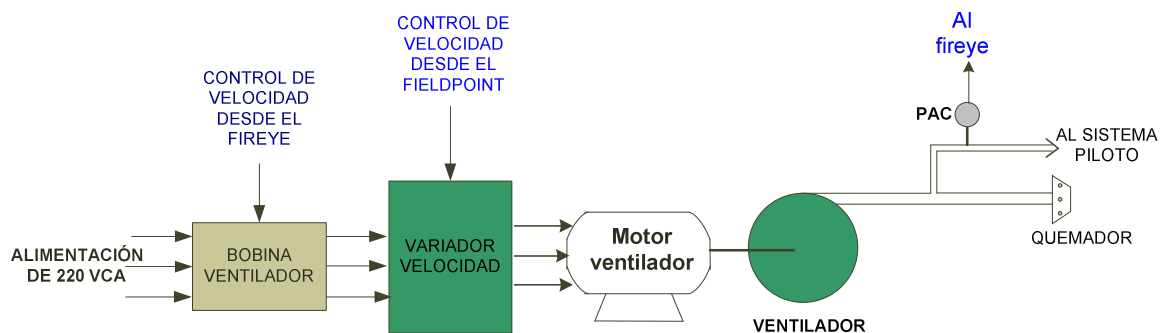
³ Opacidad es un numero adimensional que indica la relación entre la intensidad de luz incidente y la transmitida.

- Sistema de aire.
- Sistema de combustible.

➤ **Sistema de aire.** Su función es suministrar la cantidad de aire requerido para dar la capacidad de producción nominal de la caldera manteniendo una correcta relación aire combustible.

El sistema de aire utiliza un ventilador para la toma del aire del ambiente y dirigirlo hacia el quemador por un ducto y un interruptor de presión de aire (PAC) normalmente abierto que actúa como controlador de presión del aire de combustión, cerrando el circuito de arranque cuando la presión sea de 3 pulg. de H₂O. En el momento en que el ventilador se encienda, si no se detecta la presión mínima de 3 pulg. de H₂O del flujo de aire por la PAC, el circuito de arranque no cerrará y la caldera no prenderá, dando seguridad en la operación del equipo. Para graduar el flujo de aire requerido para la combustión en forma más precisa, se tiene un variador de velocidad que controla la velocidad en el motor del ventilador.

Figura 20. Componentes del sistema de aire



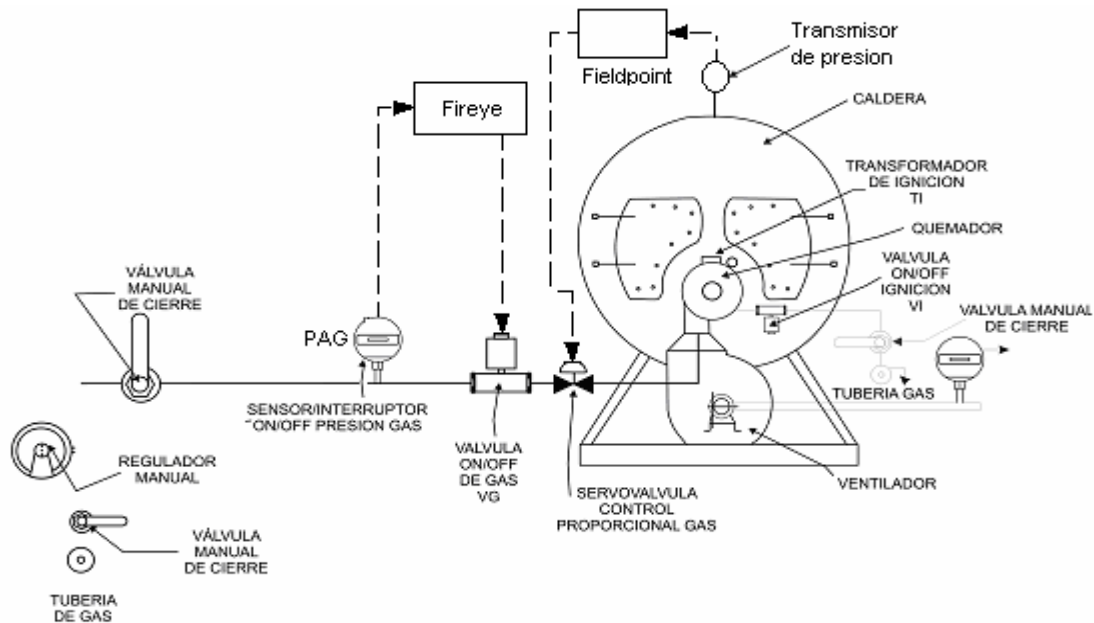
El suministro de aire es uno de los factores indispensables para el funcionamiento de la caldera, no solo en la fase de combustión sino también a través de todo el proceso de funcionamiento como por ejemplo en la prepurga y en la ignición.

➤ **Sistema de combustible.** Cumple dos funciones primordiales que son llevar el gas desde la red hasta el quemador de la caldera y proporcionar una llama piloto para el encendido del quemador, en la figura 21 se puede ver la ubicación y los componentes del sistema de combustible.

El sistema de combustible se divide en dos sistemas:

- Sistema principal de combustible.
- Sistema piloto

Figura 21. Sistema de combustible



Fuente: Autores Proyecto Control de Combustión

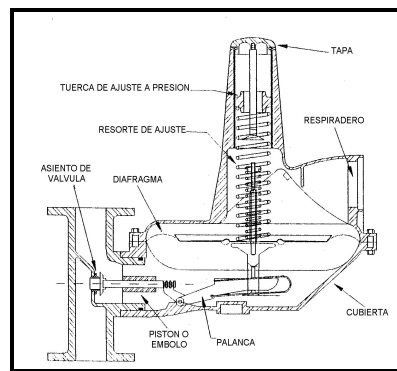
■ **Sistema principal de combustible.** En la caldera hay instalado un tren de gas, y su función es suministrar la cantidad de gas requerida por la caldera para la evaporación del agua. El sistema principal de combustible está compuesto por los siguientes dispositivos según el orden de dirección del flujo:

- Regulador de gas.
- Válvula Manual de cierre.

- manómetro de alta y baja presión
- Sensor/Interruptor **on/off** alta presión de gas, PAG
- Válvula **on/off** de gas, VG.
- Servo válvula de control proporcional de gas.

* **Regulador de gas.** El regulador es el encargado de tomar el gas directamente de la red y llevarlo a condiciones aptas para su consumo en el quemador. Esto se logra reduciendo la presión de entrada (40 Psig Aprox) y manteniendo la presión de salida (0.17 Psig Aprox) aproximadamente constante.

Figura 22. Regulador de gas

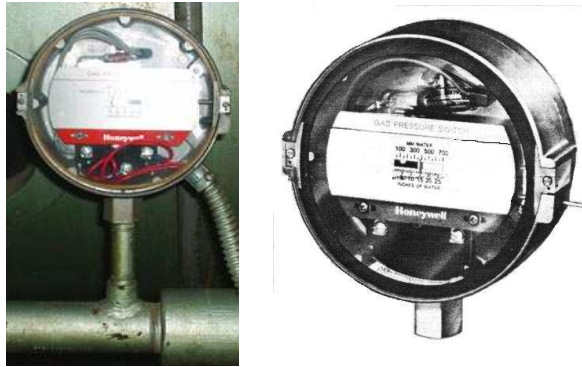


***Interruptor de presión (PAG).** Es un interruptor de corriente eléctrica accionado por presión. Se utiliza para el control límite de presión máxima de gas a la entrada del quemador y cortes de seguridad.

El interruptor de presión se encuentra en la línea de gas del sistema principal de combustible, entre el regulador de gas y la válvula de gas on-off, tiene como función limitar la presión del gas que llega al quemador, actuando como un interruptor normalmente cerrado que abrirá el circuito de la caldera desconectando la válvula principal de combustible cuando la presión sobrepasa de cierto valor predeterminado (7 in de H₂O), haciendo que la caldera se apague, este valor es

determinado por el tipo de quemador y la capacidad de la caldera para evitar que haya sobrealimentación de gas y se generen explosiones.

Figura 23. Interruptor de presión



***Válvula on/off de gas (VG).** La válvula principal de combustible (VG) es la encargada de controlar el paso del gas natural al quemador de la caldera. Esta constituida por dos partes principales: el cuerpo y el actuador.

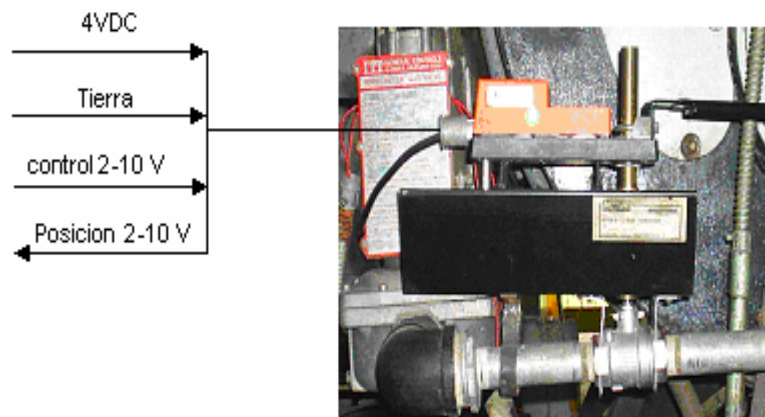
Cuando es energizado el actuador de la válvula, este se abre permitiendo el flujo de gas al quemador. En esta posición permanece la válvula hasta que por algún motivo se corte el suministro de energía, momento en el cual vuelve a su posición original, cortando inmediatamente el flujo de combustible. El accionamiento de la válvula principal de combustible es controlado por el programador de encendido (fireye), siguiendo una secuencia de control y seguridad.

Figura 24. Válvula principal de combustible



***Servo válvula de control proporcional de gas.** La servo válvula, permite regular el flujo de combustible a la caldera, actuando sobre una válvula globo de 2.54 Cm de diámetro. Su accionamiento es manual o controlado por software mediante un sistema modular distribuido basado en PC (Fieldpoint) que permite un mejor control de la combustión y se logra estabilizar la presión de vapor de manera más rápida. Requiere un voltaje de operación de 24 VD, para su control maneja un rango de voltaje de entrada-salida de 2 a 10 VDC.

Figura 25. Servo válvula de combustible



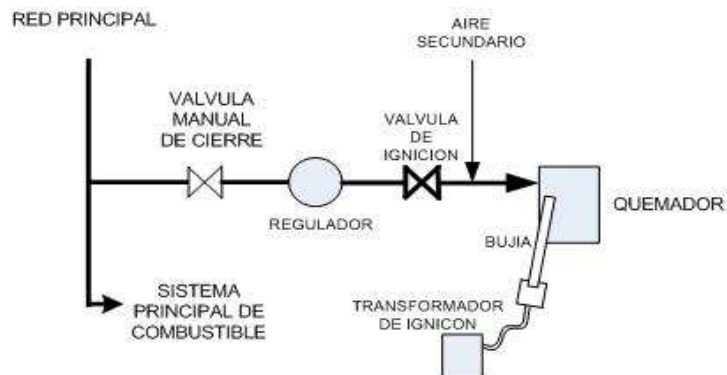
***Manómetro de alta y de baja presión.** Los manómetros de alta y de baja sirven para monitorear la presión que viene de la red de gas (manómetro de alta) y la presión después de pasar la etapa de reducción respectivamente (manómetro de baja), entre los más empleados cabe destacar el manómetro tipo bourdon. la figura 26 muestra el manómetro usado para medir la presión después del regulador en el tren de gas.

Figura 26. Manómetro tipo Bourdon



▪ **Sistema piloto.** Este sistema es el encargado de proporcionar y mantener la llama piloto para el encendido del quemador de la caldera durante el periodo de ignición. Se conforma fundamentalmente por la válvula de ignición, transformador eléctrico de ignición, electrodo de encendido (Figura 27).

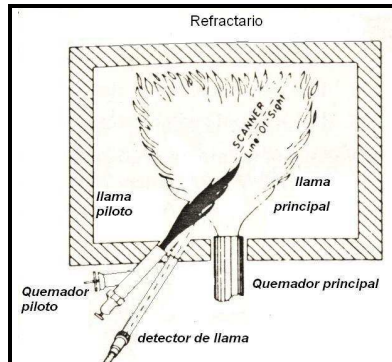
Figura 27. Sistema piloto de combustible



En el ciclo de encendido cuando el programador de encendido (sección 3.3.1) llega a la etapa de ignición, se energiza el transformador de ignición originando un arco eléctrico entre la punta de la bujía y la barra de chispa. Al instante se energiza el temporizador de ignición, por un tiempo de 10 segundos que mantiene la válvula de ignición abierta permitiendo el libre flujo de gas hacia el mezclador

donde se mezcla con aire del ventilador, toda esta mezcla pasa a través del tubo inyector y es encendida por el arco eléctrico. El aire secundario se usa para la combustión y calidad de llama del piloto. La figura 28 muestra la llama normal del sistema piloto de combustión.

Figura 28. Llama de piloto normal del sistema de combustión



Fuente: Fireye corporation

3.2 SISTEMA DE AGUA.

Sus funciones son proporcionar el agua a la caldera a la presión y flujo requerido para mantener un nivel adecuado de agua dentro de la misma y convertir dicha agua en vapor, a una presión y temperatura determinadas.

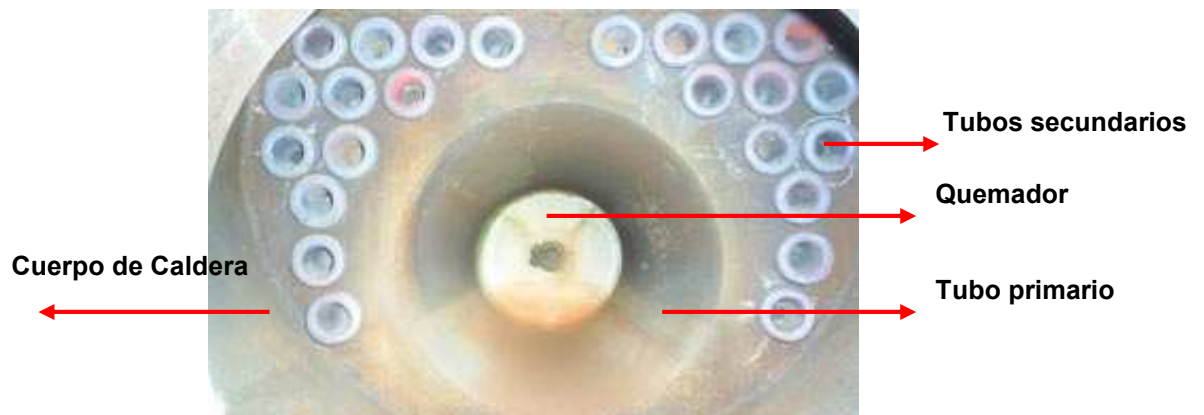
Este sistema se divide en:

- Sistema de vaporización de agua
- Sistema de alimentación de agua.

3.2.1 Sistema de vaporización de agua. Este sistema vaporiza el agua líquida y produce vapor saturado a la presión, temperatura y flujo requeridos por el proceso. Se compone por el hogar de combustión, los tubos secundarios, el quemador y el

cuerpo de la caldera que es una cámara hermética resistente a la presión, recubierta de material refractario que evita al máximo la transferencia de calor, sus materiales son aptos para el contacto con el agua, sedimentos y otras sustancias. La figura 29 muestra los tubos de fuego primario y secundario, el quemador y el cuerpo de la caldera.

Figura 29. Elementos de vaporización de agua



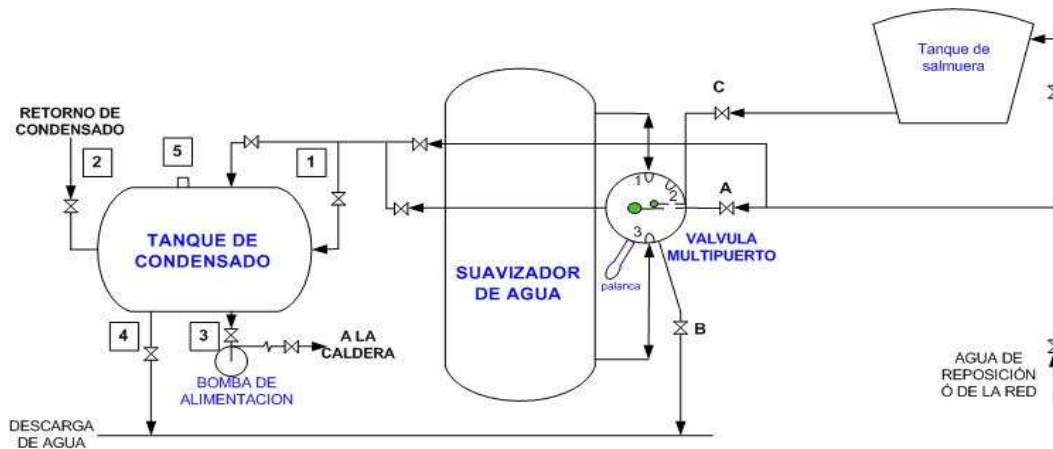
➤ **Producción de vapor en la caldera.** El proceso de generación de vapor se inicia cuando se transfiere el calor, producto de la combustión al agua contenida en la cámara de vaporización.

El quemador es el encargado de mezclar el aire y el gas de una forma turbulenta y producir la combustión. Los gases calientes viajan a través de los tubos de humo recorriendo la longitud de la caldera en dos pasos, transmitiendo el calor al agua, terminando su recorrido en la chimenea. El calor recibido por el agua hace que esta cambie de estado de líquido a vapor y adquiera la presión y temperatura requeridas.

3.2.2 Sistema de agua de alimentación. Consiste en el circuito que alimenta de agua a la caldera para la producción de vapor. Esta agua proviene de

condensados y de reposición (agua de la red publica) que debe tratarse para eliminar las sales y otras sustancias disueltas que provocan problemas de sedimentación, corrosión e incrustaciones en los tubos de la caldera.

Figura 30. Sistema agua de alimentación



La figura 30 muestra un bosquejo del sistema de alimentación de agua de una caldera, los elementos y sus respectivas conexiones, así como los pasos requeridos para el tratamiento del agua.

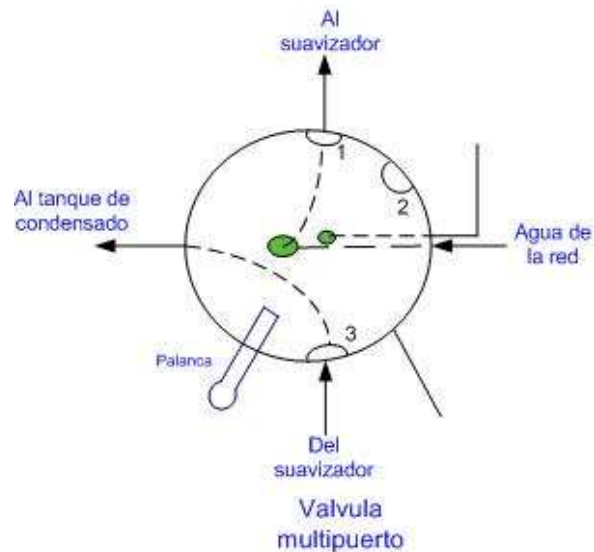
Existen diferentes métodos para tratar el agua de caldera como: los químicos (cal de sosa y el de permutita) y los térmicos.

➤ **Tratamiento del agua.** La caldera cuenta con un suavizador a base de permutita (mineral formado por sílice y aluminio, cargado negativamente) de corriente descendente. Su operación presenta dos estados:

- Operación normal.
 - Operación de regeneración.
- **Operación normal.** En este estado, el agua entra por una válvula multipuerto

situada en la parte alta del suavizador, pasa a través del lecho de permutita artificial y de partículas de cuarzo de tamaño creciente de este y sale por la parte inferior del suavizador pasando nuevamente por la válvula multipuerto y luego al tanque de condensado. Cuando se realiza esta operación, la válvula **A** (ver figura 30) debe estar abierta y la válvula multipuerto en la posición **3** (ver figura 31).

Figura 31. Válvula multipuerto en posición 3



Para desalojar el aire de la unidad, especialmente cuando se inicia la operación, deberá abrirse la válvula **B** hasta que empiece a salir agua por el drenaje.

▪ **Operación de regeneración.** Debido al uso continuo del suavizador, la permutita va perdiendo sus propiedades y debe regenerarse. Comprende tres acciones:

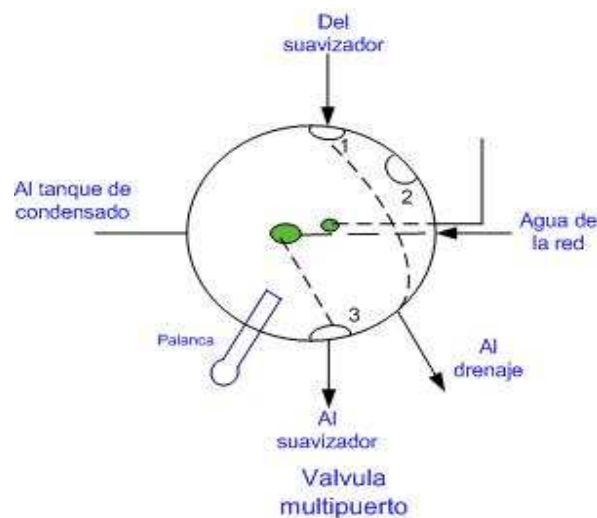
- Lavado
- Inyección de salmuera
- Enjuague.

Siempre que se vaya a cambiar de una acción a otra es necesario cerrar primero la válvula **A**, en la línea de entrada de agua, antes de cambiar la posición de la

válvula multipuerto.

***Lavado.** En esta operación se hace pasar el agua en sentido contrario al del normal funcionamiento, para expandir el lecho y liberarlo de cualquier material extraño o sedimento. El agua entra por la parte inferior del suavizador y atraviesa el lecho de abajo hacia arriba y sale por el drenaje de la válvula multipuerto arrastrando las partículas en él sedimentadas.

Figura 32. Válvula multipuerto en posición 1

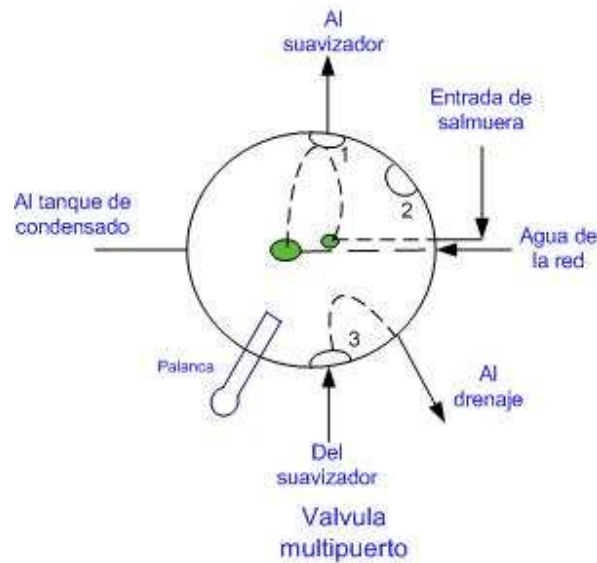


Para efectuar esta operación se cierra la válvula **A** y se coloca la válvula multipuerto en posición **1** (ver figura 30 y 32). Posteriormente, se abre poco a poco la válvula **A**, regulando el flujo para evitar arrastre de permutita por el drenaje; el lavado dura entre 15 y 20 minutos y se para cuando el agua salga completamente clara del suavizador.

***Inyección de salmuera.** La salmuera es una solución al 10 % de cloruro de sodio. Se inyecta por la parte superior de la unidad mediante el hidroeyector incorporado a la válvula multipuerto regenerando la permutita.

Para efectuar esta operación se cierra la válvula **A** y se coloca la válvula multipuerto en posición **2**(ver figura 30 y 33). Luego se abre la válvula **A** y **C** y el nivel en el tanque de salmuera empieza a descender lentamente.

Figura 33. Válvula multipuerto posición 2



***Enjuague.** Su función es eliminar el exceso de sal que se ha utilizado en la regeneración. Una vez se haya inyectado toda la salmuera, se cierra la válvula **C** y se sigue pasando agua a través de la unidad por nos 20 a 30 minutos. El enjuague termina cuando el agua que sale por el drenaje no tiene sabor salino,

➤ **Componentes del sistema de agua de alimentación.** Éste circuito lleva el agua hasta la caldera y comprende la bomba de alimentación, el tanque de condensado, la tubería y accesorios. Enseguida se identifican éstos elementos.

■ **Tanque de condensado.** Es un recipiente cilíndrico el cual debe tener el volumen adecuado para proporcionar agua a la caldera cada vez que ella la necesite. Este tanque debe disponer de las siguientes conexiones:

1. Conexión para la entrada de agua fría de la red publica
2. Entrada del retorno de condensado proveniente del condensador.
3. Salida para la bomba de alimentación con sus respectivos filtros y válvulas de cierre.
4. Drenaje para purgas de fácil maniobra, para eliminar la suciedad que se deposita en el fondo
5. Ducto de aire para evitar sobre presiones en el tanque y una llave para purgar el tanque eliminando suciedad que se deposita en el fondo.
6. Indicador de nivel fácilmente visible para el personal encargado de la sala de calderas.
7. Termómetro para controlar la temperatura en el tanque.

Para visualizar estas conexiones ver gráficos 30 y 34.

Figura 34. Tanque de condensado



- **Bomba de alimentación de agua.** La función de la bomba de alimentación es mantener la caldera con un nivel mínimo de agua que permita un funcionamiento continuo y seguro. Su funcionamiento se controla por dispositivos automáticos que dan la orden de encendido cuando el nivel de agua en la caldera esta por debajo del nivel normal de operación. Las bombas deben impulsar el agua a la presión de operación de la caldera.

El tipo de bomba utilizada en el laboratorio es de turbina con una capacidad de 15 GPM, una cabeza máxima de 500 pies, una presión de operación de 300 Psig, una velocidad de rotación de 1750 RPM y un motor trifásico cerrado con rotor de jaula de ardilla.

El impulsor tipo turbina con paletas en la periferia, es especial para bajo caudal y alta cabeza , maneja vapores y aires sin causar vacíos en el bombeo, permitiendo manejar líquidos en ebullición a cabezas de succión mas elevadas que la presión de evaporación y ofrece mayores cabezas y es mas eficiente con bajos flujos que las bombas centrifugas.

Figura 35. Bomba de alimentación

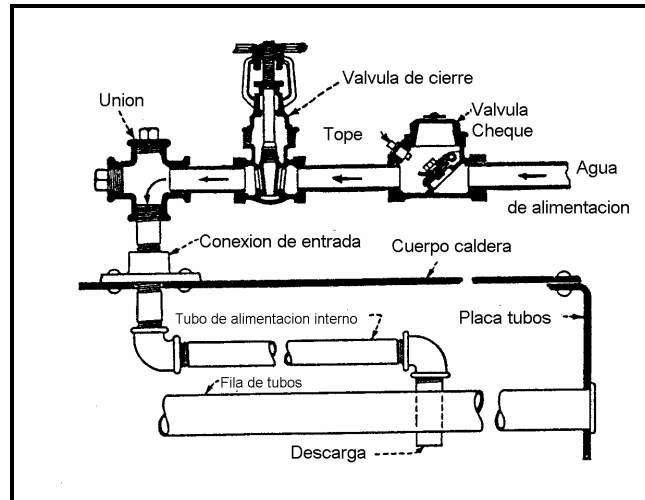


■ **Válvulas y accesorios.** Las válvulas utilizadas son del tipo de globo, compuerta y para aplicaciones direccionales válvulas de cheque. En general se usan para derivar y obstruir el flujo en caso de averías, reparación o mantenimiento del tanque de condensado, la bomba o la caldera.

Las válvulas cheque o antiretorno funcionan como control direccional y de presión ya que dejan pasar el fluido en una sola vía y mantienen una presión diferencial

entre los lados de la válvula. El correcto montaje es indicado en la figura 30 donde primero se instala la válvula cheque y aguas abajo la válvula de cierre.

Figura 36. Instalación del suministro de agua a la caldera



Fuente: Calderas Continental

3.3 SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO.

El sistema de control y monitoreo es el encargado de hacer funcionar todos los sistemas anteriormente expuestos, proporcionando control, seguridad y protección tanto al equipo como al operario.

Para tener un adecuado control de la operación de una caldera es necesario conocer los factores que determinan el estado de las variables asociadas con la misma; estos factores son principalmente: las presiones y temperaturas de los flujos de gas, aire, agua y vapor; y el nivel de agua. Para comprender mejor las relaciones entre estos factores y la manera como se afectan entre si, se pueden clasificar en tres categorías: factores a regular, factores de perturbación, factores de control y regulación.

Factores a Regular. El funcionamiento de la caldera es seguro mientras estos factores se mantengan en un determinado valor, los mas importantes son: presión de vapor a la salida de la caldera, exceso de aire / combustible, nivel de agua y presión del combustible.

Factores Perturbadores. Se originan en la demanda de vapor que desequilibra la relación entre la energía que entra en forma de combustible y la que sale en forma de vapor; de esta manera se afectan los factores a regular.

Factores de Control. Con estos se compensa la influencia de los factores perturbadores sobre los factores a regular; los principales a tener en cuenta son:

- Flujo de combustible: con el, se equilibra la variación de la presión de vapor.
- Flujo de Aire: con el se mantiene una relación aire / combustible adecuada.
- Flujo de Agua de Alimentación: debe ser igual al flujo de vapor que sale, más las pérdidas para mantener el nivel.

Los sensores, actuadores y controladores que presentan las calderas dependen de las necesidades y estrategias de control, así como del proceso.

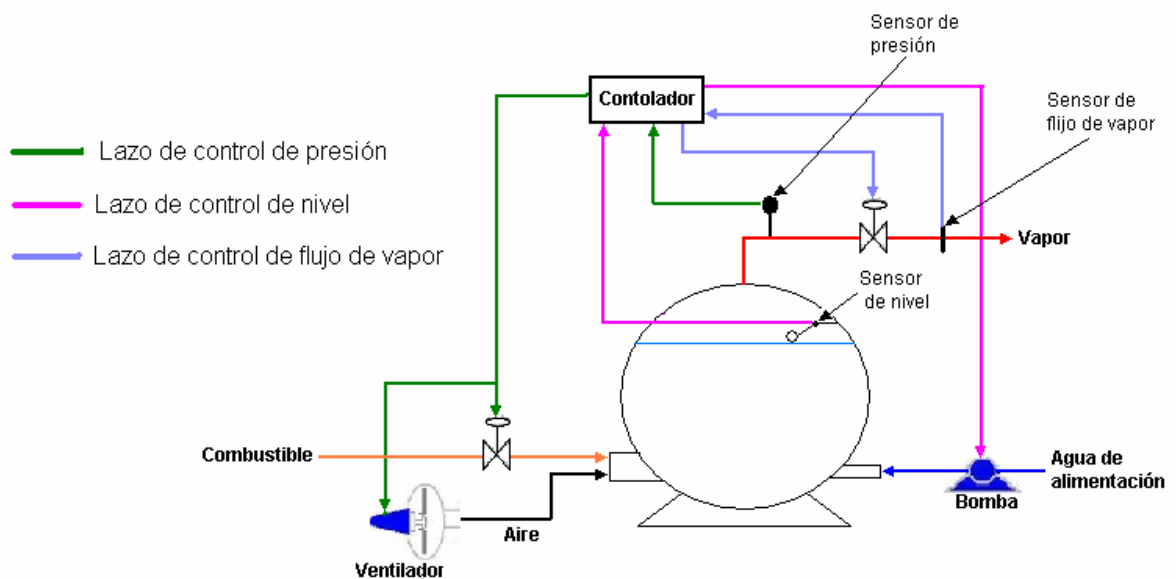
Los sensores utilizados en la caldera son: termocuplas tipo T que miden la temperatura del vapor y de los gases de combustión, transductores de presión para medir la presión antes y después de la platina de orificio, detector de llama, detector de nivel.

Los actuadores de la caldera son: Motores paso a paso que convierten pulsos en apertura de una válvula, servo válvula que controla la apertura de una válvula según el voltaje suministrado, motores eléctricos que mueven el ventilador y la bomba.

Los dispositivos de control reciben las señales desde los sensores, las comparan con las señales de referencia y dependiendo del error o taraje generan una señal correspondiente a los actuadores a través de una secuencia de operación definida. Estos dispositivos definen las estrategias de control que se pueden realizar en un equipo o proceso específico.

En la caldera, la presión es detectada por un sensor, que envía una señal al dispositivo de control, que genera una acción correctiva sobre el actuador para mantener las condiciones que se requieran en la caldera según el proceso y la estrategia de control utilizada. Los dispositivos para el control y los factores que los afectan están presentes en toda la secuencia de operación de la caldera.

Figura 37. Lazos de control en la caldera



La figura 37 muestra como se interrelacionan los sensores, actuadores y controladores de la caldera y como forman los lazos de control cerrado tanto para la presión como para el nivel de agua.

El sistema de control y monitoreo de la caldera es un conjunto de dispositivos encargados de manejar las demandas de energía a la salida de la caldera. La energía de salida de la caldera es función de la rata de combustible y aire correspondientemente, asociado con el agua que se requiera para la producción de vapor. Por este motivo el punto neurálgico para la confiabilidad en la operación de la caldera es su sistema de combustión y su control asociado.

3.3.1 Dispositivos de control de la caldera. Los dispositivos de control actuales de la caldera son dos:

- El controlador de estado sólido (estrategia de control on-off)
- Un control basado en PC (estrategia de control continuo con fieldpoint).

➤ **Controlador de estado sólido para quemadores automáticos.** El controlador por excelencia para calderas piro-tubulares es un controlador de estado sólido, que es el elemento principal de la programación de funciones de la caldera. Puede definirse como el conjunto de dispositivos que realiza una secuencia lógica automática única de operaciones de arranque, parada y operación normal; esta secuencia, que esta controlada por dispositivos electrónicos, debe evitar que se cometan errores humanos de operación.

La secuencia involucra todas las actividades o variables que son de alto riesgo y por consiguiente influyen en la seguridad del equipo y del personal.

Las variables que involucran bloqueos a la secuencia de operación de la caldera pueden ser:

- Presión y flujos de consumo mínimo y máximo, los cuales operan sobre el

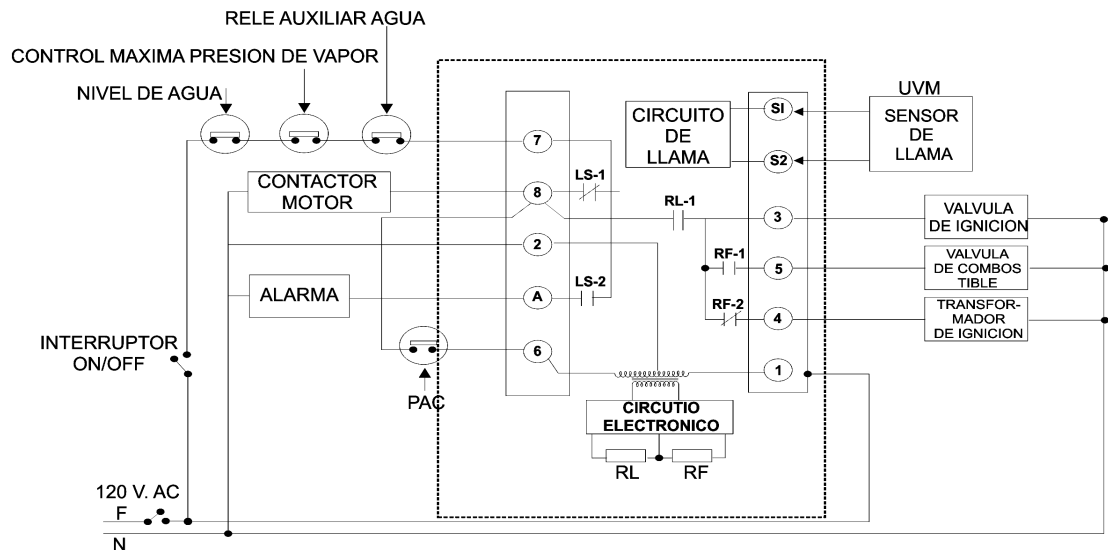
combustible.

- Aire y sus condiciones de operación de flujo y presión mínimos.
- Tiempo de purga, el cual debe garantizar la expulsión de los gases que se encuentren en la caldera antes de que se inicie el proceso de combustión.
- Condiciones de operación de la llama en el quemador.

Sus marcas más conocidas son “Fireye” y “Honeywell”, la caldera del laboratorio de plantas térmicas tiene un controlador marca **Fireye serie M2**.

La secuencia de operación del controlador proporciona un barrido, ignición y seguridad de llama para quemadores de gas de caldera. El programador utiliza un detector de llama tipo UV (Ultravioleta), que tiene como función comprobar la existencia de combustión en el quemador, para evitar así que en determinado momento el gas escape sin ser quemado, emitiendo una señal eléctrica de 700 V. Su tiempo de respuesta a la falla es de 4 segundos.

Figura 38. Esquema eléctrico Fireye



Fuente: Fireye Corporation

El circuito de la figura 38 muestra el cableado eléctrico de un controlador Fireye para calderas de ignición por llama piloto, a través del cual se puede encender, apagar y mantener estable la combustión en la caldera.

■ **Encendido de la caldera.** Los pasos seguidos por el fireye para iniciar el encendido de la caldera son:

1. Con la señal de puesta en marcha y los controles de nivel (CN), límite de presión de vapor (PV) y el relay auxiliar de agua (RC) cerrados, el terminal 8 energiza el circuito del motor del ventilador que cierra el control de aire de combustión (PAC) que alimenta al terminal 6 que energiza el circuito electrónico, iniciando un barrido de gases o prepurga para evacuar la totalidad de los gases que hallan podido quedar en el circuito de humos. El tiempo de barrido debe ser el necesario para introducir un volumen de aire cuatro veces el volumen de los tubos de la caldera (aproximadamente 30 segundos).

Al mismo tiempo se energiza el circuito de control de la bomba de agua de alimentación para mantener un nivel correcto de agua dentro de la caldera.

2. Transcurrido el periodo de prepurga se cierra RL-1 y energiza al terminal 3 que suministrara la corriente a la válvula de ignición y el terminal 4 que suministra corriente al transformador de ignición que genera una chispa durante un periodo de ignición de 10 segundos formando una llama piloto.

3. Cuando la llama piloto es detectada por el sensor de llama, RF-1 se cierra y energiza el terminal 5 el cual suministra corriente a la válvula principal de combustible; RF-2 se abre deshabilitando el terminal 4 y terminando el periodo de ignición.

Si la llama piloto no es detectada al final del periodo de ignición la válvula de ignición y el transformador son desenergizados.

4. Cuando los controles de operación abren su circuito, o si ocurre una falla en el suministro de energía, el sistema entero es desenergizado pues el periodo de encendido del controlador tiene pasos secuenciales únicos.

Si la llama no se detecta durante el periodo de fuego la válvula principal de combustible será desenergizada, y mandara una señal de alarma. Para volver a encender la caldera se debe repetir el proceso anterior.

La secuencia de encendido automático de la caldera arranca cuando aplicamos energía al motor del ventilador que inicia el periodo de prepurga que dura entre 30 a 45 segundos, al termino del cual se energiza la válvula y el transformador de chispa de ignición durante 4 segundos aproximadamente, dando origen a la llama piloto e iniciando un periodo de prueba de 10 segundos. Cuando la llama es detectada por el detector de llama y luego del periodo de prueba, el controlador abre la válvula principal de combustible originado el proceso de combustión en el quemador.

Toda esta secuencia se realiza siempre y cuando la caldera este en condiciones aptas para su operación eficiente y segura; estas condiciones son:

- Un nivel mínimo de agua en la cámara de vaporización de la caldera.
- Un suministro comprobado de aire de combustión por parte del ventilador
- Suministro de gas a determinada presión.
- Circuitos de controles de operación cerrados.

No se permitirá ninguna tentativa automática de reencendido después de un fallo de encendido, para poder realizar un reencendido se procederá a subsanar la

causa de la anomalía, y luego al reencendido mediante una acción manual, iniciando el ciclo nuevamente con el prebarrido.

Parada normal. Cuando el circuito de control de operación se abre, la válvula principal de combustible es desenergizada al igual que el contactor del motor del ventilador y todas las luces indicadoras del panel de control se apagan

Parada de seguridad. Si la llama piloto no es detectada durante los 10 segundos de prueba en la secuencia de encendido, la válvula de ignición y el transformador de ignición serán desenergizados.

■ **Elementos auxiliares de control.** Para que el fireye pueda realizar el control sobre la caldera, esta tiene elementos específicos de control en cada uno de los sistemas de la caldera.

Los controles de operación de la caldera que interactúan con el programador de encendido Fireye son:

- Control de nivel de agua
- Control de límite de presión
- Control auxiliar de nivel

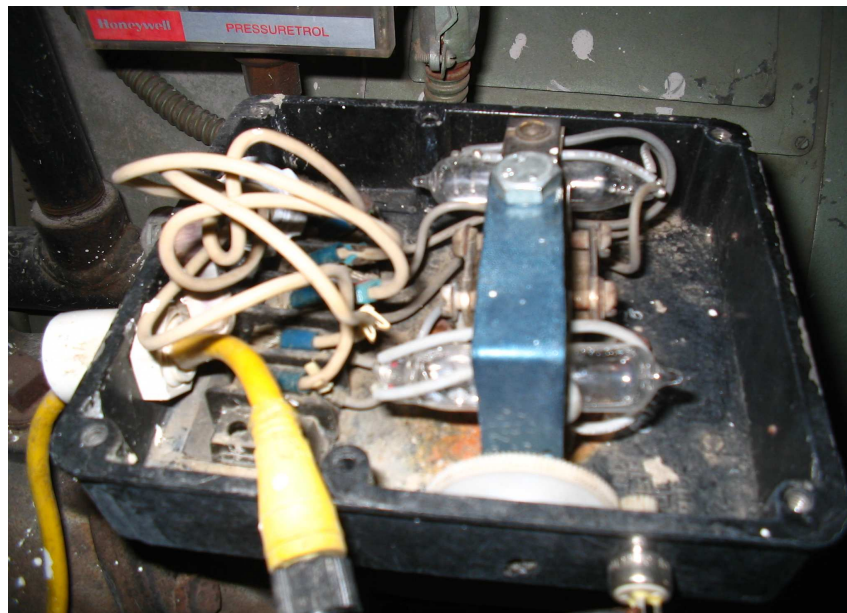
***Control de nivel.** El control de nivel de agua se basa en el balance másico que debe existir entre el agua de alimentación bombeada que entra y el flujo de vapor que sale para las diversas aplicaciones. Para que las condiciones de funcionamiento sean estables básicamente, el flujo másico de vapor y el flujo másico de agua deben ser iguales. Para ello el nivel de agua de la caldera debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de unos límites aceptables para su buen funcionamiento, permitiendo detectar y mantener un nivel adecuado de agua en la caldera, controlando el arranque y parada de la bomba de

alimentación de agua, además de interrumpir el circuito del quemador y el accionamiento de una alarma visual en caso de bajo nivel.

El control de nivel de agua mas usado en calderas es el “M^C DONNELL serie 157” (Figura 39) que consiste en un flotador construido de un material resistente a altas presiones y temperaturas hasta de 150 Psig. Este flotador por medio de una palanca mueve dos interruptores de gota de mercurio que envían una señal al programador electrónico, El programador da la orden de apagado de la bomba al detectar un alto nivel o una orden de encendido de esta cuando el nivel de agua haya bajado hasta el punto preestablecido.

Al cuerpo de fundición va instalado un vidrio indicador de nivel de agua, tres válvulas que permiten la salida de aire de la caldera. La válvula de la parte superior debe mantenerse abierta en el encendido hasta que empiece a salir vapor por ella y luego debe cerrarse.

Figura 39. Mc Donnell instalado en la caldera del laboratorio de plantas térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander

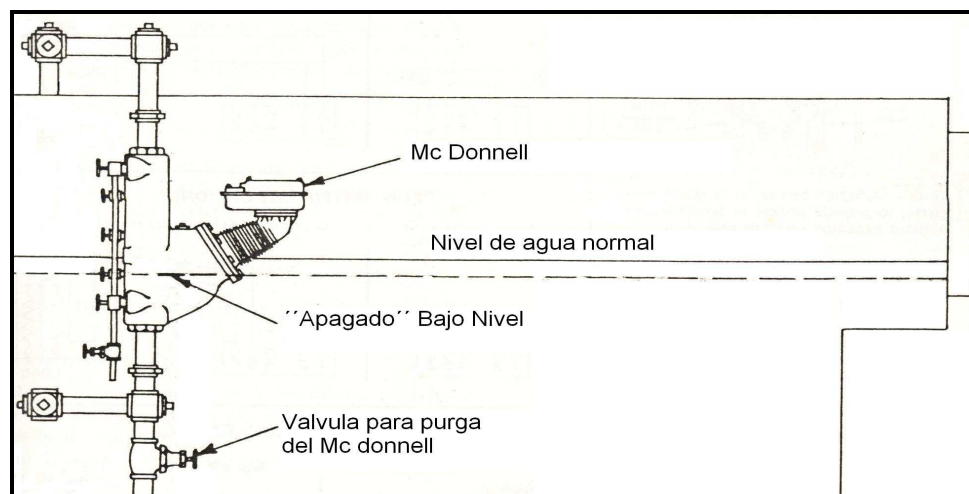


En el cuerpo tiene grabada una marca o flecha horizontal que indica el nivel mínimo de agua al cual puede funcionar la caldera y esta ha 1.5 pulgadas por debajo del nivel normal de agua de la caldera.

Es de gran importancia mantener el nivel de agua en la caldera entre un rango preestablecido para evitar explosiones o daños severos a la estructura. Por ende se debe tener precaución cuando se instale el Mc Donnell para que sea localizado en la altura correcta en la caldera. Se debe instalar de tal forma que el nivel mínimo de agua este $\frac{3}{4}$ " por encima de la última línea de tubos internos más alta de la caldera.

La figura 40 muestra el control de nivel de la caldera y su secuencia de operación. La bomba prendera cuando el nivel de la caldera baje $\frac{3}{4}$ " con respecto al nivel normal marcado en el cuerpo del Mc Donnell. Cuando el nivel llegue a este punto el circuito del controlador será interrumpido y el circuito de alarma activado por bajo nivel y así permanecerá hasta que el nivel de agua sea nuevamente reestablecido.

Figura 40. Control de nivel "Mc Donnell"



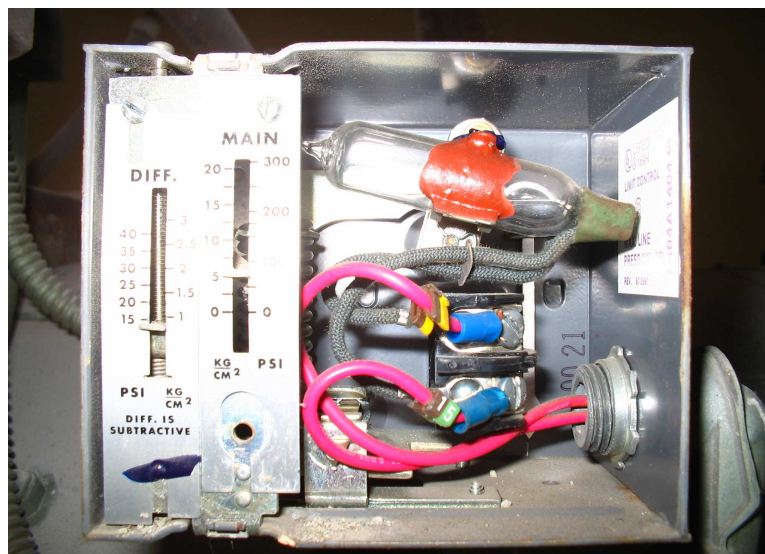
Fuente: Mc Donnell

* **Control limite de presión.** El controlador limite de presión de vapor es el encargado de apagar la caldera cuando se alcanza una presión limite superior preestablecida, de esta manera se suministra una protección automática a sobre presiones.

La caldera tiene un sistema de control de combustión ON / OFF, marca Honeywell; que a través del control limite de presión prende y apaga la caldera dentro de un rango de presión predeterminado. Cuando enciende al caldera la servo válvula y la válvula de gas están a máxima apertura y el ventilador trabaja a 1750 rpm, condición esta para una combustión adecuada (llama azul y estable).

El interruptor presenta dos escalas como se aprecia en la figura 41, una principal que fija el máximo limite de presión donde se apaga automáticamente la caldera y una auxiliar que fija el limite de presión mínima de funcionamiento, en el cual se inicia el proceso de encendido, para nuestro caso la mínima diferencia es de 15 Psi.

Figura 41. Control limite de presión

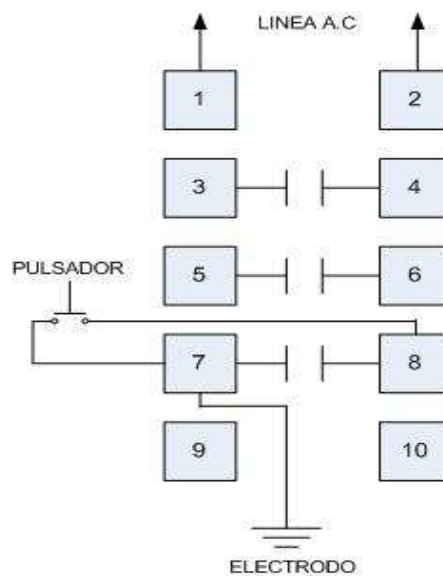


El mecanismo esta basado en una ampolla de vidrio con una gota de mercurio que sirve de interruptor, pivotada en el centro y conectada a un muelle sensible a la presión.

El control limite de presión funciona básicamente como un interruptor de corriente, el cual abre el circuito y apaga la caldera cuando se alcanza la presión a la que fue tarada en la escala principal debido al desplazamiento de la gota de mercurio y cierra el circuito cuando se tiene una presión igual a la del taraje máximo menos la establecida en la escala auxiliar iniciando nuevamente la secuencia de encendido.

* **Control auxiliar de nivel RC.** Es un dispositivo de seguridad para el control del nivel de agua, formado fundamentalmente por un electrodo y un relay con contactos normalmente abiertos y normalmente cerrados de los cuales uno esta intercalado en la línea de controles de operación de la caldera (contacto 5-6) la señal del electrodo es llevada al panel de control donde se encuentra el relay, que su función es impedir que empiece la secuencia normal de encendido de la caldera, cuando no se tiene un nivel de agua adecuado.

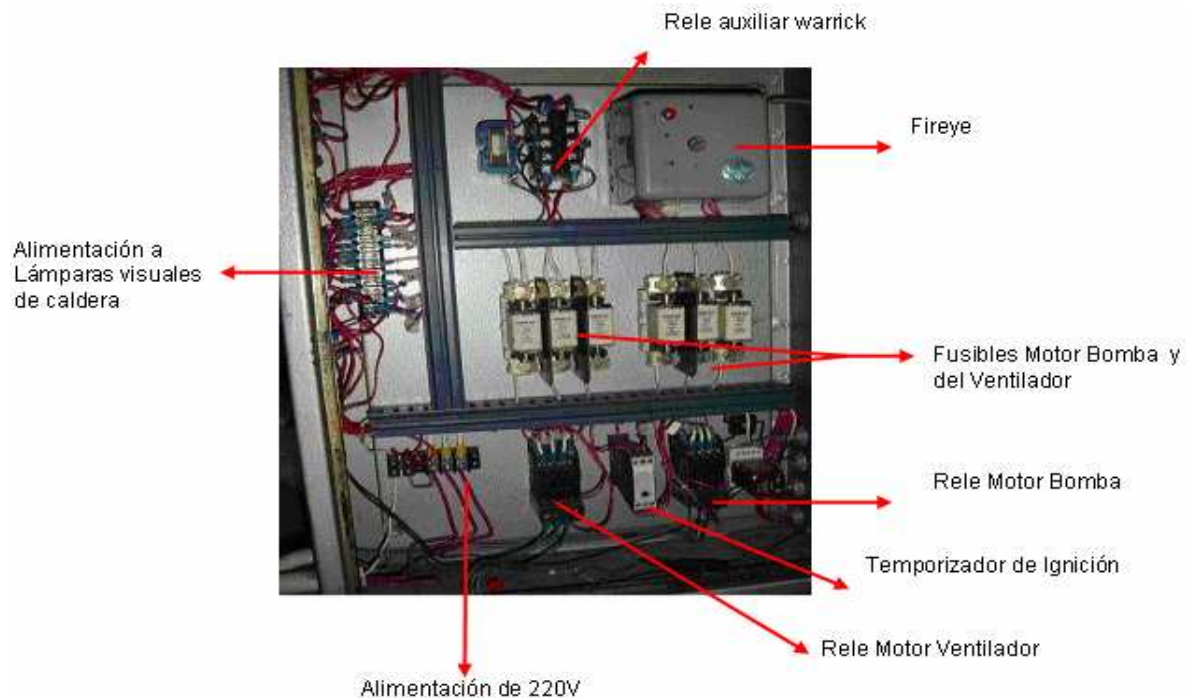
Figura 42. Terminales control auxiliar de nivel



De acuerdo al esquema de la figura 42 el control de nivel funciona de la siguiente manera: cuando el nivel de agua esta abajo del electrodo los contacto 3-4 esta cerrados y el contacto 5-6 esta abierto. Si el nivel alcanza al electrodo los contactos cambian de abiertos a cerrados y de cerrados a abiertos.

* **Panel de control.** En el interior de este conjunto se encuentra el controlador o programador “fireeye” el cual es el elemento principal de la programación de funciones de la caldera para el control on-off. También se halla el rele auxiliar de nivel (warrick), los contactores del motor del ventilador, del motor de la bomba de alimentación de agua y de la válvula de gas on-off, así como fusibles para la bomba y el ventilador y el temporizador de ignición. En la parte exterior superior se encuentran los selectores de control de combustión y alimentación de agua y en la parte frontal se localizan el interruptor principal de la caldera y las lámparas indicadoras de válvula de gas, de ignición, alarma y de bajo nivel y el fusible.

Figura 43. Panel de control estrategia on-off



El cableado externo debe ir protegido por un tubo para protegerlo del calor y de golpes. Este panel de control debe estar a la vista y de fácil acceso, por lo general va montado sobre la misma caldera.

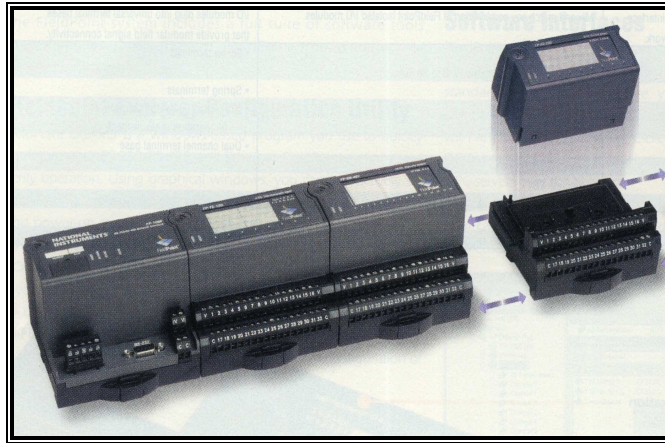
➤ **Sistema de control y adquisición de datos basado en PC.** Para la toma de datos y control continuo, fue implementado un sistema basado en PC, que permitiera registrar: la presión de la caldera, el flujo de vapor a través de la platina de orificio, la temperatura de los gases de combustión, a su vez controlara los equipos del sistema de generación de vapor.

El controlador para la estrategia de control continuo del sistema de generación de vapor del Laboratorio de Plantas Térmicas consta de un componente hardware (módulos FieldPoint) y un software (Delfhi 6.5), que realiza las operaciones programables de los procesos de transferencia de información desde los sensores ubicados en la caldera, hasta el computador para su adecuada evaluación y análisis.

El monitoreo y la programación de control se realizó en un sistema distribuido modular de E/S de adquisición de datos de National Instrument, Fieldpoint, que provee soluciones económicas para aplicaciones de control y supervisión industrial.

El sistema FieldPoint incluye una variedad de módulos de E/S analógicos y digitales, al igual que el módulo de interfaz de redes inteligentes. Fue diseñado para una instalación rápida, de fácil mantenimiento y máxima confiabilidad. Los módulos FieldPoint incluye inteligencia para maximizar la confiabilidad y predictibilidad del sistema, incluyendo una extensa detección de fallas, temporizadores vigía y estado de encendido programable y modo de falla.

Figura 44. Banco Fieldpoint de monitoreo y control



Fuente: National Instrument

Un banco de fieldpoint lo conforman tres componentes básicamente:

1. Modulo de red
2. Modulo de entradas y salidas.
3. Bases terminales.

Cada módulo de E/S de FieldPoint está instalado sobre una base que contiene terminales para las conexiones externas hechas en el campo.

Los módulos fieldpoint empleados para este propósito se muestran en la figura 45, están ubicados de izquierda a derecha como:

Figura 45. Banco de módulos fieldpoint utilizado en la caldera



Fuente: National Instrument

■ **Banco Fieldpoint.** El Banco Fieldpoint utilizado en las pruebas, está constituido por seis módulos, de los que a continuación se describen su función:

- Módulo de red FP-1000/1001.
 - Módulo FP-DO-400.
 - Módulo FP-AO-200
 - Módulo FP-AI-110
 - Módulo FP- CTR-500.
 - Módulo FP-TC-120.
- **Modulo de red FP-1000.** Es el módulo de interfase para el manejo de comunicaciones entre el computador patrón y los módulos de E/S. La comunicación con el computador se realiza a través del puerto serial RS- 232, y con los módulos mediante el bus local de alta velocidad a través del cual se entregan y reciben órdenes para el control de la caldera. El modulo de red esta alimentado a 16 VCD y a su terminal C llegan las tierras de los sensores de la caldera.

Figura 46. Modulo de red FP-1000



* **Módulo FP-DO-400.** Este módulo de salidas digitales está alimentado con una fuente de 5 VCD y es utilizado para entregar las siguientes señales por sus respectivos canales:

- Canal 0: Señal de dirección de la tarjeta manejadora del motor paso a paso de la turbina.
- Canal 1: Señal AWO (All Windings Off Input) de la tarjeta manejadora del motor paso a paso de la turbina. Cuando ésta señal está baja, las bobinas del motor estarán libres, no hay torque de sostenimiento.

El módulo está alimentado externamente con 5 VCD desde la tarjeta de fuentes; de su terminal V simultáneamente se envía alimentación al modulo FP-AI-110 y al opto de la tarjeta manejadora del motor paso a paso.

Figura 47. Modulo de Salidas Digitales FP-DO-400



* **Módulo FP-AO-200.** Este módulo de salidas análogas está alimentado con 10 VDC desde la tarjeta de fuentes, y es utilizado para enviar las siguientes señales por sus respectivos canales:

- Canal 0: Envía una señal de 0 – 10 V a la bornera de consigna de velocidad AIV del variador de velocidad del motor del ventilador de la caldera.
- Canal 1: Envía una señal de 0 – 10 V a la bornera de consigna de velocidad AIV del variador de velocidad del motor de la bomba de alimentación de agua de la caldera.
- Canal 3: Envía una señal de 0-10 V a la bornera de posición requerida de la servo válvula de la caldera.

De su terminal de alimentación de 10 VDC se alimenta también el modulo FP-CTR-500.

Nota: Ya que el rango de salida del módulo es de 0-20 mA, se necesitó utilizar una resistencia de 500 Ω en cada canal para obtener el rango 0-10 V.

Figura 48. Módulo de salidas analógicas FP-AO-200



* **Módulo FP-AI-110.** Este módulo de entradas análogas se alimenta con 5 VDC del modulo FP-DO-400, recibe señales de los siguientes dispositivos por los respectivos canales:

- Canal 0: Recibe una señal analógica de 0 – 20 mA proveniente del sensor de presión anterior a la platina de orificio de la línea de vapor.
- Canal 2: Recibe una señal analógica de 0 – 20 mA proveniente del sensor de presión posterior a la platina de orificio de la línea de vapor.
- Canal 3: Recibe una señal analógica de 0 – 10 V proveniente del borne de posición actual de la servo válvula de la caldera.
- Canal 4: Recibe una señal analógica de 0 – 5 V proveniente del sensor utilizado para la medición de nivel de agua de la caldera.

Figura 49. Módulo de entradas análogas FP-AI-110



* **Módulo FP-CTR-500.** Este módulo contador, generador y suministrador de pulsos, recibe y envía señales de los siguientes dispositivos por los respectivos canales:

- Canal 1: cuenta un tren de pulsos generado por el canal 8.
- Canal 2: cuenta los pulsos generados por el canal 12 (solo hasta los pulsos requeridos por el motor paso a paso) y estos son los enviados al canal 13.
- Canal 6: cuenta un tren de pulsos de una señal amplificada del encoder óptico enviada por la tarjeta de fuentes. Del encoder, salen tres cables, dos son de alimentación (5 VDC) y el otro envía una señal de tren de pulso de 0 – 5 V a la tarjeta de fuentes. El cable de señal (azul) entra al terminal identificado en la tarjeta de fuentes como IN, la alimentación del encoder (rojo) va al terminal de 5 VDC y la tierra (naranja) va al terminal GND. La señal de tren pulsos proveniente del encoder es de 0 – 5 V, y necesita ser amplificada para que se adecue al rango de lectura del módulo contador (9 – 12 V). Esta amplificación se realiza en la

tarjeta de fuentes, entregando la señal de pulsos que sale del terminal PULSE OUT al módulo contador FP-CTR-500.

- Canal 8: recibe pulsos del canal 13 y esta asociado al canal 1 para habilitarlo mientras este recibiendo pulsos.
- Canal 12: suministra los pulsos generados por el canal 1 al motor paso a paso para su accionamiento.
- Canal 13: Envía los pulsos generados por el canal 2 al canal 8 que esta asociado al canal 1.

Figura 50. Modulo contador FP-CTR-500



* **Módulo FP-TC-120.** Este módulo de termocupas, no requiere alimentación externa, recibe señales de temperatura desde diferentes puntos por los respectivos canales:

- Canal 2: Recibe una señal de mV proveniente de la termocupla ubicada en la salida primaria de humos.

- Canal 3: Recibe una señal mV proveniente de la termocupla ubicada en la chimenea de los humos de la caldera.

Figura 51. Modulo de termocuplas FP-TC-120



Para ver como se instalan los diferentes módulos fieldpoint y para conocer sus diferentes especificaciones técnicas, características y modo de operación, sugerimos al lector leer la tesis “Adecuación de un Sistema de Control para el Manejo de la Caldera y el Turbogenerador de una Planta Térmica”, de Víctor Amaya y Gustavo Romero, edición 2001, capítulo tres.

▪ **Software de control.** Se creó en el programa Delphi 6 y consta de dos partes:

- Reconocimiento de los módulos por parte de Delphi
- Programa de control

* **Reconocimiento de los módulos por parte de Delphi**

Consta de tres partes:

- Comunicación con el fieldpoint.
- Declaración y configuración de los módulos fieldpoint.

- Recepción y envío de señales

Comunicación con el fieldpoint. La comunicación con el Fieldpoint se realiza a través del puerto serial mediante 4 unidades básicas que fueron implementadas para este propósito, basados en las herramientas que dispone Windows y el protocolo de comunicación desarrollado por National Instrument para establecer la comunicación con los módulos de red de Fieldpoint:

- Fieldpoint
- FPAuxiliar
- ComunicacionFP
- General

Las Unidades General, FPAuxiliar, ComunicacionFP son llamadas al usar la primera Forma o FrmPrincipal, necesitan ser declaradas después del comando implementation así:

Implementation

uses General, FPAuxiliar, ComunicacionFP;

Estas Unidades se colocan cuando se necesite abrir el puerto de comunicación y declarar la configuración de los módulos Fieldpoint que se estén trabajando.

Cuándo se necesite leer o interactuar cualquier señal con el Fieldpoint deberá declararse las unidades Fieldpoint y General así:

Implementation

uses FieldPoint, General;

Declaración y configuración de los módulos fieldpoint. Al crear la primera forma o FrmPrincipal deberán ser declarados y configurados los módulos Fieldpoint, se comienza por establecer la comunicación y abrir el puerto serial así:

```
FPCommLab:=TCommSerial.Create;  
TCommSerial(FPCommLab).Open('COM1',10,115200)
```

Luego se declaran los módulos, los canales y sus respectivos rangos y atributos con los cuales se irán a trabajar:

```
FPBancoLab:=OFPBanco.Create;  
FPBancoLab.PComFP:=@FPCommLab;  
    FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_1000,0);  
    {0= Modulo de Principal FP-1000}  
    FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_DO_400,1);  
    {1= Modulo de Salidas Digitales FP-DO-400}  
    FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorRango:=0;  
    {Rango tiene solo dos opciones 0 o 1, no esta- esta}  
    FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_AO_200,2);  
    {2= Modulo de Salidas Analogas FP-AO-200 }  
    FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorRango:=0;  
    {Rango tiene solo dos opciones 0 o 1,  
    lim inf(0 o 4 mA)-lim sup (21 mA) }  
    FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_AI_110,3);  
    {3= Modulo de Entradas Analogas (corriente y voltaje  
    FP-AI-110}  
    FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorRango:=0;  
    {Rango de 0 a 10, dependera de la señal recibida.}  
    FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorAtributo[0]:=2;  
    {Atributo tiene uno solo que define el filtro de la señal}  
    FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_CTR_500,4);  
    {4= Modulo contador (Id_ FP-CTR-500}
```

```

FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorRango:=0;
{Rango tiene uno solo, cuenta entre 0 y 65535.}
FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorAtributo[0]:=2;
{Atributo tiene cuatro que definen la configuración de las entradas y
salidas del modulo}
{atributo 0 = 65535 valor de la cuenta}
{atributo 1 = 0 fuente de conteo}
{atributo 2 = 5 habilitación del gate}
{atributo 3 = 0 seteo o no el canal al leer}
{atributo 4 = 1 rechazo al ruido}
FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_TC_120,5);
{5= Modulo de Termocuplas FP-TC-120}
FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorRango:=5;
{Rango 5 = -270, + 1770C}
FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorAtributo[0]:=2;
{Atributo, define el tipo de termocupla usado, 2 tipo T}

```

Los números al final del paréntesis obedecen a la ubicación de los módulos en el orden en el que se acomodan en el panel de control.

Si el rango no es declarado el Fieldpoint escogerá por defecto el rango 0. Para conocer los rangos y atributos de los módulos referirse al anexo dos.

Definidos el rango y el atributo de cada uno de los canales de cada modulo, se debe habilitar cada uno de los canales por los cuales se intercambiaran datos con el Fieldpoint así:

```

with OFPModulo(FPBancoLab.Lista[y]).ListaCanales do
begin
  Canales[x].SiLectura:=True;

```

end;

y = El numero del modulo en el orden de colocación en el Fieldpoint.

X = El numero del canal del respectivo modulo teniendo en cuenta que empiezan desde cero

Recepción y envío de señales. Para poder leer una señal de entrada en el Fieldpoint deberá llamarla de la siguiente manera:

```
FPModulo:=OFPModulo(FPBancoLab.Lista[y]);  
FPModulo.LeerDatos;  
(Botondelphi).Propiedad:=FPFormatValor(FPModulo.ListaCanales.  
Canales[x],z);
```

Z =numero de decimales que usted quiere que tenga la lectura leída.

Para enviar una señal ya sea de corriente o voltaje deberá ser así especificada:

```
FPModulo:=OFPModulo(FPBancoLab.Lista[y]);  
OFPModulo(FPBancoLab.Lista[y]).EscribirCanal(x,k);
```

K = señal de corriente o voltaje que necesito enviar a través del Fieldpoint dentro de los Limites determinados por el mismo.

*** Programa de Control.** Este es el encargado de mantener la presión, el nivel de agua en la caldera y el flujo de vapor en los valores requeridos. Para esto se utilizo una acción de control PID, (ver figura 52) a través del cual se comparan los valores de referencia con los actuales y se determina un error, en relación a este el control determina una acción correctiva para disminuir este error.

Figura 52. Implementación de una acción de control PID

Error: Presión referencia – Presión Actual Cp: $K_p * (\text{Error} - \text{Error 1})$ Ci: $K_i * (\text{Error})$ Cd: $K_d * (\text{Error} - 2 * \text{Error 1} + \text{Error 2})$ Valor de control: Cp+Ci+Cd Error 1: Error anterior al error Error 2: Error anterior al error 1	Kp:0.4 Ki:0.7 Kd:0.3
---	------------------------------------

Fuente: Instrumentación Industrial Creus, Antonio

▪ **Dispositivos del sistema de control basados en PC.** El control modular basado en PC Fieldpoint requiere de un conjunto de dispositivos que adecuen las señales de los sistemas de la caldera. Una vez reunidas todas las señales el modulo de red mediante una comunicación serial RS-232 envía las señales a un computador, donde se procesan utilizando un software, para que desde el computador se ejecute la operación de control sobre la caldera.

Los dispositivos se distribuyen en una pequeña planta termoeléctrica que esta conformada por la caldera, su economizador y chimenea y un grupo turbogenerador.

Los sistemas de control de la caldera adecuados al sistema de control basado en PC (Fieldpoint) son los siguientes:

- Control de presión.
- Control del nivel de agua.
- Control flujo de vapor

* **Control de presión.** Se uso un hardware cuya señal de control es la presión en la caldera, y que actúa simultáneamente sobre la servo válvula proporcional de combustible y un variador de velocidad conectado al motor del ventilador para la regulación de la combustión.

Para regular la presión de vapor en la caldera a través del software debemos:

- Establecer el valor deseado de presión.
- Especificar las constantes proporcional, integral y derivativa para el algoritmo PID.
- Leer la presión del vapor de salida
- Ejecutar el programa.
- Regular la apertura de la válvula de combustible y la señal del variador de velocidad del motor ventilador,

Para realizar el control de combustión en la caldera se determino experimentalmente que valores de voltaje de apertura de válvula de combustible, corresponden a los valores de voltaje del variador de velocidad del motor ventilador, que mantenían una combustión adecuada (llama azul y estable).

Para determinar la ecuación que relaciona el voltaje de la válvula de gas con el voltaje del variador de velocidad se tomaron experimentalmente los siguientes datos:

Tabla 8. Relación aire-combustible

Voltaje Válvula de gas	Voltaje Ventilador
7.38	9.7
6.8	8.7
6.45	8.2
6.04	7.5
5.7	6.9
5.11	5.9
4.77	5
4.66	4.3

Se realizó una aproximación polinomial entre voltaje ventilador y voltaje de la válvula (tabla 8) y se obtuvo la siguiente ecuación que se utilizó para el control de combustión.

$$\text{Vol}_{\text{ven}} = 0.2428\text{vol}_{\text{valgas}}^3 - 4.6156\text{vol}_{\text{valgas}}^2 + 30.654\text{vol}_{\text{valgas}} - 62.721 \quad (3.1)$$

Los dispositivos utilizados en el hardware de control de combustión son:

- Transductor de presión
- Variador de velocidad
- Servo válvula proporcional

Transductores de presión. El sistema actual cuenta con dos sensores de presión, uno marca FOXBORO instalado antes de la platina de orificio y otro marca SETRA, instalado después de la platina de orificio que sensan la presión de la caldera. Estos sensores son de material piezoeléctrico y producen una corriente proporcional a la presión que es enviado al módulo de entradas análogas FP- AI-110 del banco fieldpoint. En la figura 53 se ven los sensores en la línea de salida de vapor de la caldera.

Figura 53. Transductores de presión



El esquema de conexión de cada uno de los sensores se muestra en la figura 54 y 55, en donde puede observarse la salida de corriente enviada al modulo de entradas análogas FP_AI-110 del banco fieldpoint.

Figura 54. Esquemas de conexión del Transductor de presión marca SETRA

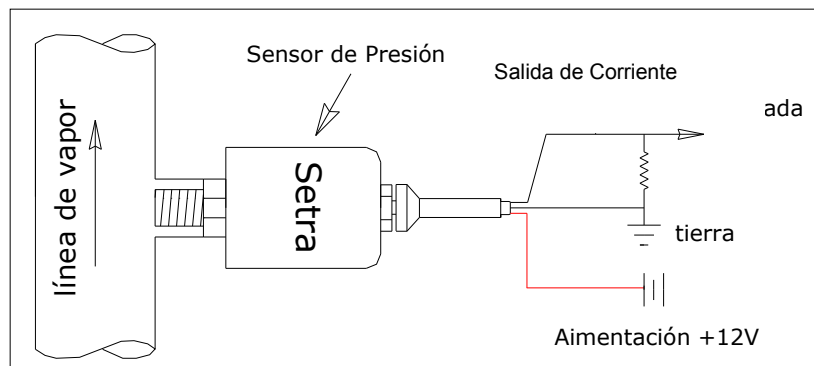
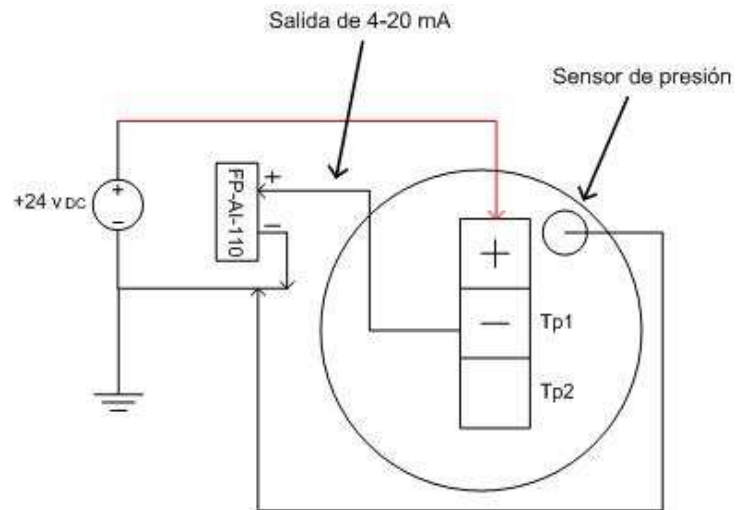
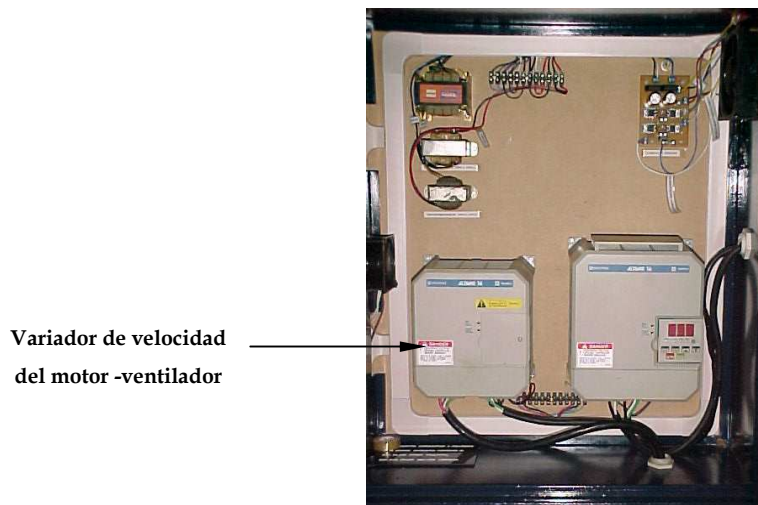


Figura 55. Esquemas de conexión del Transductor de presión marca FOXBORO



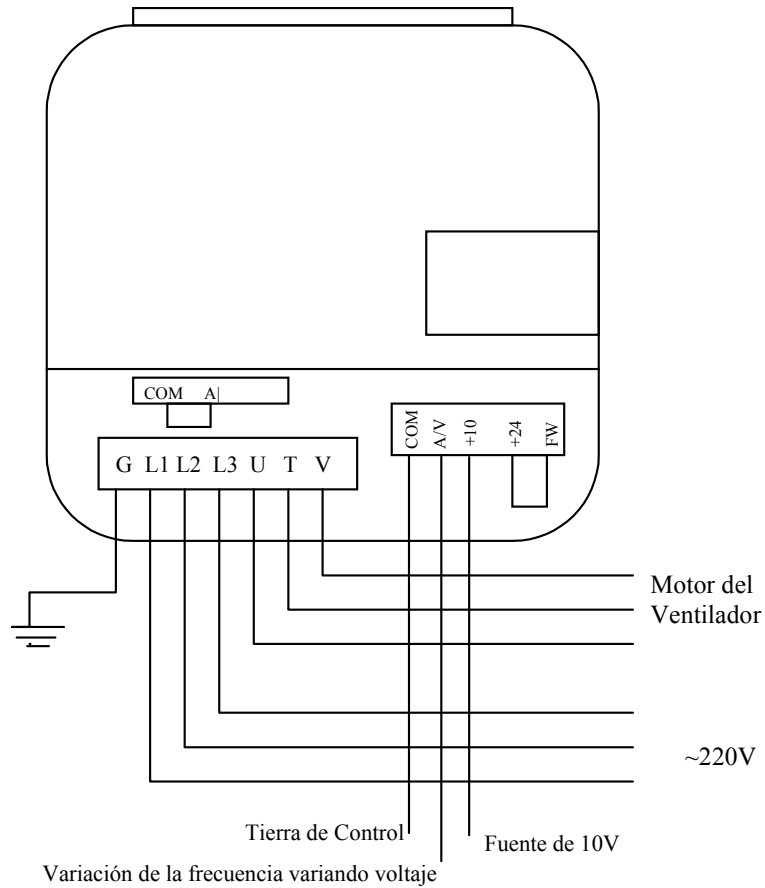
Variador de velocidad electrónico. Tiene como fin controlar la velocidad en el motor del ventilador y así lograr regular la cantidad de aire requerida para la combustión de manera mas precisa. El variador utilizado es un Altivar 16 ubicado en el cofre de potencia como se puede ver en la figura 56.

Figura 56. Variador de velocidad del motor del ventilador



El esquema de conexiones del variador de velocidad se muestran en la figura 57.

Figura 57. Esquema de conexión del variador al motor del ventilador



El variador de velocidad para la consigna de velocidad tiene una entrada analógica de 0-10 VDC (referenciada A/V) que controla la variación de la frecuencia del motor variando el voltaje de entrada analógico. Este voltaje es enviado por el modulo de salidas análogas FP-AO-200 del banco fieldpoint.

Las características eléctricas principales del variador de velocidad Altivar 16 se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Características eléctricas del Altivar 16

<i>Modelo</i>		<i>ATV16U41M2</i>
<i>Potencia total disipada a la carga nominal</i>		<i>65 W</i>
<i>Alimentación</i>	<i>Tensión V</i>	<i>208 – 10 % ... 240 + 10 %</i>
	<i>Frecuencia Hz</i>	<i>50 / 60 ± 2</i>
<i>Tensión de salida</i>		<i>Tensión de salida igual a la tensión de la red</i>
<i>Fuentes interna disponible</i>		<i>1 salida +10 V para el potenciómetro de operación manual (10kΩ) régimen máximo 10 mA.</i>
<i>Consigna de velocidad</i>		<i>1 entrada analógica a tensión 0 – 10 V.</i>
<i>Señalización</i>		<p><i>2 LEDES en la parte frontal:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>LED rojo encendido = defecto.</i> • <i>LED verde encendido = Altivar en tensión.</i> <p><i>Con aditivo: Visualización codificada mediante 3 visualizadores de 7 segmentos</i></p>

Servo válvula. Referirse al sistema de combustión, figura 25.

* **Control de nivel de agua.** Los dispositivos que interviene en el control de nivel de agua son:

- Indicador de nivel a través de un potenciómetro.
- Un variador de velocidad que controla la velocidad del motor de la bomba para la regulación de agua.

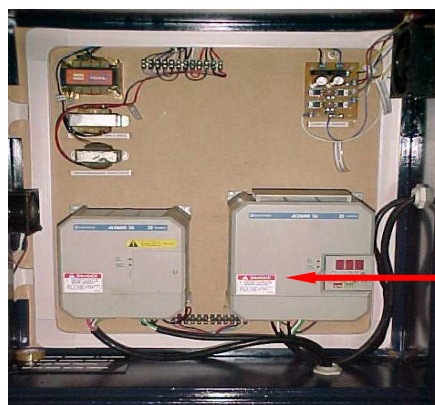
Potenciómetro. La caldera tiene un sensor de nivel tipo flotador M^cDONELL. Al sensor M^cDONELL se le adapto físicamente un potenciómetro que indica el nivel de agua de la caldera.

El nivel de agua indicado por el flotador debe corresponder a un voltaje equivalente analógico a la salida del potenciómetro cuando el flotador sube o baja. Esta salida analógica es enviada al modulo de entradas análogas FP-AI-110 del banco fieldpoint.

Variador de velocidad electrónico. Tiene como fin controlar la velocidad en el motor de la bomba de alimentación de agua, para mantener la caldera con un nivel de referencia de agua que permita un funcionamiento continuo y seguro. Sus características ya fueron mencionadas en la sección anterior. En la figura 58 se ve el variador Altivar 16 ubicado en el cofre de potencia.

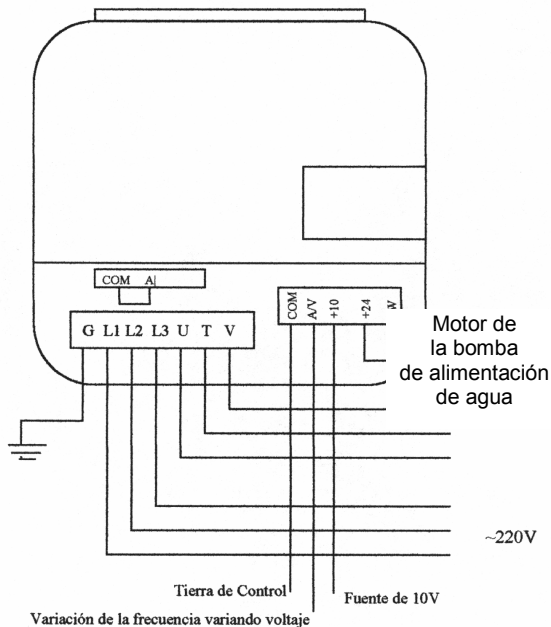
El variador para la consigna de velocidad tiene una entrada analógica de 0 -10 V (referenciada AIV) que controla la variación de la frecuencia del motor variando el voltaje de entrada analógico. Este voltaje analógico (0 – 10 V) es enviado por el módulo de salidas análogas FP-AO-200 del banco FieldPoint. El esquema de conexiones del variador de velocidad se muestra en la figura 59.

Figura 58. Variador de velocidad del motor de la bomba de alimentación de agua



Variador de velocidad
de la bomba de
alimentación de agua

Figura 59. Esquema de conexión del variador al motor de la bomba de alimentación de agua



* **Control de flujo de vapor.** Se uso un hardware cuya señal de control es la caída de presión a través de una platina de orificio, y que actúa sobre una válvula proporcional que regula el flujo de vapor. Esta válvula reguladora es accionada por un motor paso a paso.

Los dispositivos que interviene en el control de flujo de vapor son:

- Transductores de presión y platina de orificio que determinan la cantidad de flujo actual circulante.
- Motor paso a paso y válvula proporcional que mantienen aproximadamente constante el flujo de vapor hacia la turbina.

Transductores de Presión y Platina de Orificio. Tienen como objeto medir la presión diferencial a través de la platina de orificio y así poder calcular el flujo de vapor de salida de la caldera. Estos sensores son de material piezoeléctrico y producen una corriente proporcional a la presión que es enviado al modulo de

entradas análogas FP- AI-110 del banco fieldpoint. Ver dispositivos para control basado en PC, sistema de combustión, figuras 53, 54 y 55.

La platina instalada esta construida bajo la norma I:S:O: 5167 (the International Organisation for Standardización, REF : 5167-1 : 1991 (E)), que especifica la geometría y método de uso (instalación y condiciones de operación) de platinas de orificio.

Los medidores de flujo por restricción están basados en la aceleración del fluido a través de una garganta, debido a que se conserva una relación entre el flujo másico y la caída de presión.

La ecuación que relaciona \dot{m}_v y ΔP es:

$$\frac{C * \varepsilon_1 * \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} = \frac{4 * \dot{m}_v}{\pi * D^2 * \sqrt{2 * \Delta P * \rho_1}} \quad (3.2)$$

Donde

$$C = 0.5959 + 0.0312 * \beta^{2.1} - 0.1840 * \beta^8 + 0.0029 * \beta^{2.5} * \left(\frac{10^6}{Re_d} \right)^{0.75} \\ + 0.0900 * L_1 * \beta^4 (1 - \beta^4)^{-1} - 0.0337 * L_2' * \beta^3$$

$$L_1 = 1$$

$$L_2' = 0.47$$

El factor de expansión ε_1 esta dado por la siguiente ecuación (numeral 8.3.2.2 de la norma)

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{(0.41 + 0.35 * \beta^4) * \Delta P}{k * P_1}$$

La densidad del vapor ρ_1 en función de la presión es igual a:

$$\rho_1 = 0.0344 * P_1 + 0.1304 \text{ Kg/m}^3$$

La viscosidad del vapor depende del rango de la presión

si $P_1 > 89.6338$ (Psia)

$$Visc = \exp(-7 * \ln(10)) * (0.1162 * P_1 + 132.0512) \text{ Pa.s}$$

si $39.17614 < P_1 < 89.6338$ (Psia)

$$Visc = \exp(-7 * \ln(10)) * (0.2004 * P_1 + 124.4604) \text{ Pa.s}$$

si $39.17624 < P_1$ (Psia)

$$Visc = \exp(-7 * \ln(10)) * (0.4511 * P_1 + 114.5849) \text{ Pa.s}$$

El número de Reynolds se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{4 * \dot{m}_v}{\pi * D * visc} \quad (3.3)$$

Con los datos de la platina

$$D = 50 \text{ mm}$$

$$d = 15 \text{ mm}$$

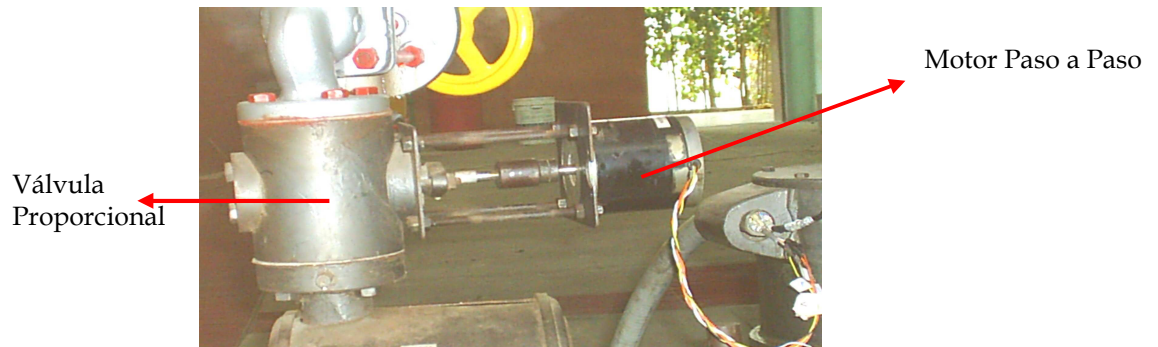
$$\beta = 0.29$$

$$k = 1.3 \text{ para el vapor de agua}$$

Se despeja \dot{m}_v de la ecuación 3.2 y calcula el flujo de vapor por hora.

Motor paso a paso y válvula proporcional. La válvula proporcional regula el flujo de vapor, el actuador de esta válvula es un motor paso a paso.

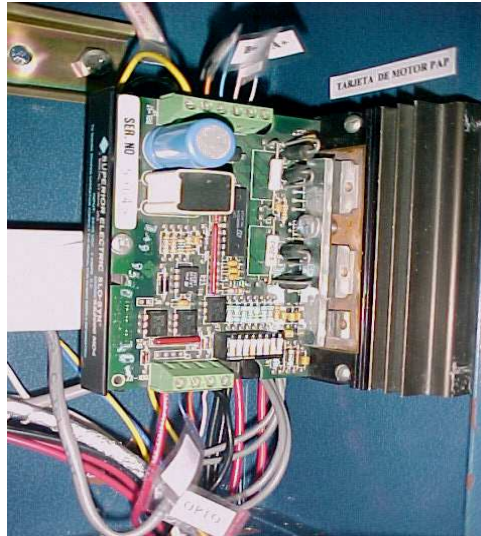
Figura 60. Motor paso a paso y válvula proporcional



La función del motor paso a paso es posicionar la válvula de control proporcional y permitir pasar mayor o menor cantidad de vapor. Para cumplir esta función el motor paso a paso necesita una tarjeta manejadora (ver figura 61). La manejadora convierte los pulsos de movimiento (pulse) enviados por el módulo FP-CTR 500 y los de dirección (Dir) y torque de sostenimiento (AWO) enviados por el módulo de salidas digitales FP-DO-400 del banco FieldPoint, en suministro de corriente a una u otra bobina de acuerdo a la secuencia propia del motor paso a paso.

La tarjeta manejadora utilizada es de la casa fabricante *WARNER ELECTRIC* filial de la *DANA CORP*. El modelo es SS2000DM4 de la familia *SLO – SYN*, con una capacidad nominal máxima de 3.5 amperios, a tensión de trabajo entre 24 y 40 VDC.

Figura 61. Tarjeta manejadora del motor paso a paso de la válvula proporcional



La tarjeta manejadora tiene seis terminales de potencia que alimentan las bobinas del motor paso a paso; cuatro terminales de control que controlan las señales hacia bobinas del motor paso a paso y ocho pines de control que regulan el paso y la corriente hacia el motor. Ahora se muestra una descripción de cada uno de ellos. Ver figura 62 y tablas 10, 11, 12.

Tabla 10. Terminales de Control hacia el motor PAP

TERMINAL	DESCRIPCIÓN
1 OPTO	Alimenta los circuitos integrados, debe ser conectado a +5 VDC.
2 PULSOS	Un cambio entre alto y bajo emite un pulso. Frecuencia máxima 20 KHz
3 DIRECCIÓN	Suministra la dirección de rotación. Si es alta el motor se mueve en dirección del reloj, si es baja, se mueve en sentido contrario.
4 AWO	Suministra el torque de sostenimiento. En alto lo deja disponible y se puede mover, si es bajo ocurre lo contrario y el motor no se mueve.

Tabla 11. Terminales de Potencia hacia el motor PAP

TERMINAL	DESCRIPCION
1	Terminal 1 de la primera bobina del motor paso a paso
2	Terminal 2 de la primera bobina del motor paso a paso
3	Terminal 1 de la segunda bobina del motor paso a paso
4	Terminal 2 de la segunda bobina del motor paso a paso
5	Suministro de voltaje (24 y 40 VDC)
6	Tierra de la fuente de voltaje

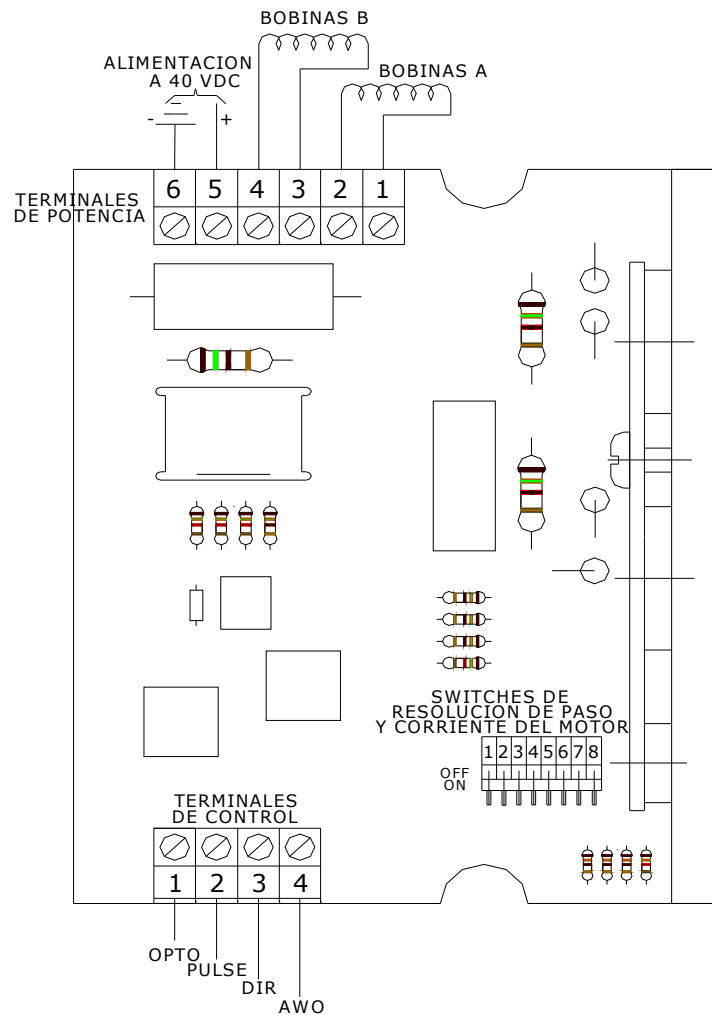
Tabla 12. Pines de Control

PIN	DESCRIPCION
1	0.5 Amp
2	1.0 Amp
3	1.5 Amp
4	2.0 Amp
5	2.5 Amp
6	3.0 Amp
7	3.5 Amp
8	Pin en ON: Paso completo (200 pulsos / revolución) Pin en OFF: Medio paso (400 pulsos / revolución)

Nota: los pines numerados del 1 al 7 dan el nivel de corriente a las bobinas del motor paso a paso, y el pin 8 el numero de pasos por revolución. La tarjeta manejadora valida solo el pin que este en la posición ON.

En el montaje de la tarjeta, el pin 5 está en ON para alimentar las bobinas del motor paso a paso a 2.5 Amp y el pin 8 está en ON para que el motor gire a 200 pulsos / revolución.

Figura 62. Diagrama esquemático de la tarjeta del motor PAP de la turbina



Debido a que las señales que llegan a los terminales de control de la tarjeta manejadora se distorsionan, se tiene una tarjeta de flancos. La tarjeta de flancos está ubicada en el cofre de mando inferior y está alimentada desde la tarjeta manejadora con 5 VCD. La tarjeta se diseñó debido que los pulsos de las señales PULSE, DIR Y AWO (tarjeta controladora del motor paso a paso de la turbina) en el flanco de bajada (cambio de 1 a 0) emitido por el módulo FP-DO-400 una vez conectada la tarjeta no eran verticales, sino que tenían una caída paulatina de forma cóncava, de modo que las señales de control para el funcionamiento del motor paso a paso no eran correctas.

Figura 63. Tarjeta de flancos

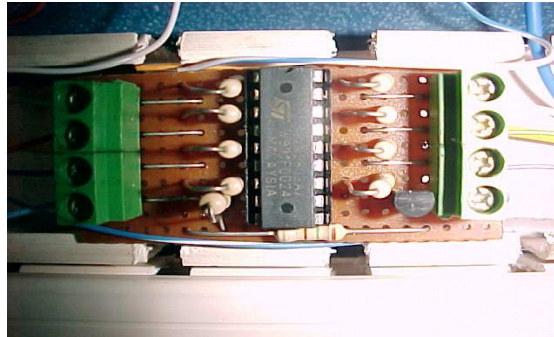
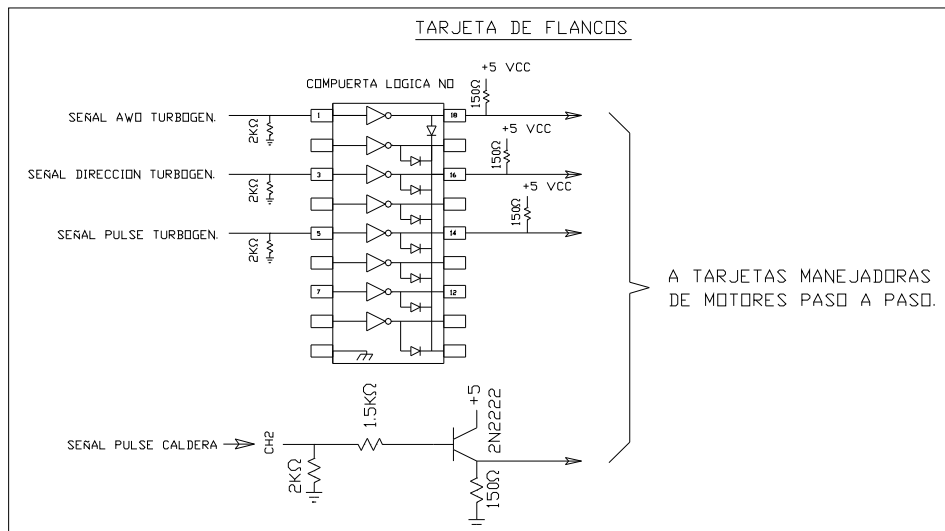


Figura 64. Diagrama esquemático de la tarjeta de flancos



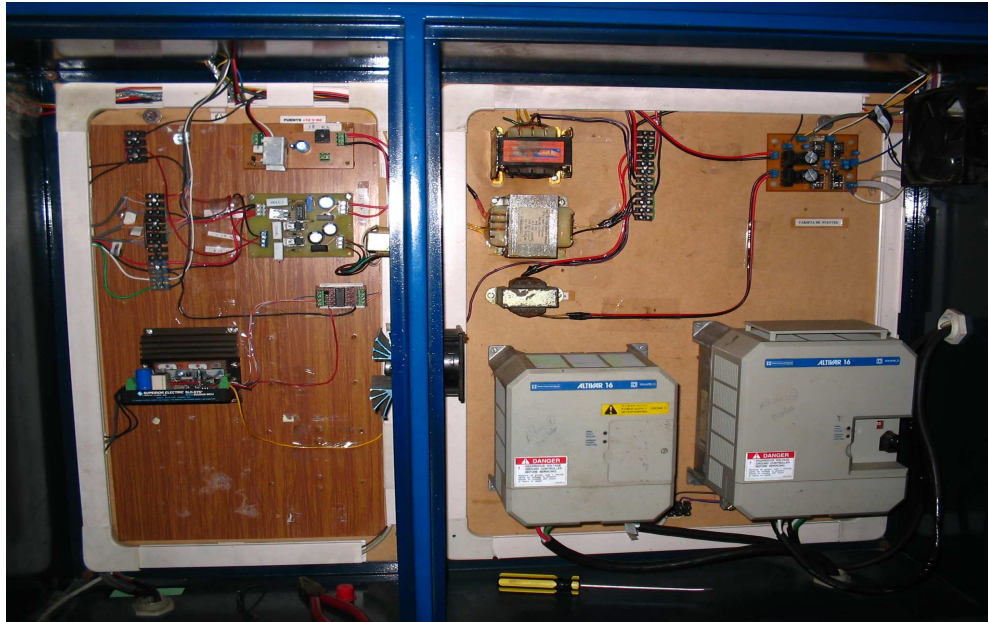
* **Tablero de control.** El tablero de controles esta dividido en dos paneles principales.

En el primero se encuentran todos los dispositivos electrónicos para la alimentación y el control de los equipos y sensores, en el segundo tenemos los dos variadores electrónicos de velocidad del ventilador y de la bomba de alimentación, la tarjeta fuente y algunos transformadores.

Cuenta con dos ventiladores que funcionan como extractores de calor, estos se encienden cuando se pulsa el switch del banco del fieldpoint.

En la figura 65, se puede ver una fotografía del tablero de control.

Figura 65. Tablero de control



En el anexo tres, se muestra un plano de general de todos los componentes y las conexiones que fueron necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de control basado en PC.

4. SIMULACIÓN

La simulación es una metodología de análisis basada en la construcción de un modelo más simple que describe el comportamiento de un sistema real, típicamente implementado en un ordenador, el cual permite generar observaciones dadas ciertas entradas. Tales observaciones permiten diseñar y realizar experimentos con el modelo con el fin de extraer conclusiones de sus resultados para apoyar la toma de decisiones.

El termino modelo tiene diferentes significado para diferentes personas. En este trabajo se utilizaron modelos matemáticos, los cuales representan los diferentes procesos físicos que se llevan a cabo en el sistema de interés. Para resolver las ecuaciones matemáticas que se utilizan en los modelos se desarrolla un programa de computador.

Hay que asumir que una simulación será tan exacta como lo sean las ecuaciones de partida utilizadas en el modelo que representa el sistema real y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización.

Las razones para desarrollar y usar una simulación son:

- Hace posible el análisis, diseño, entendimiento, operación y control de los sistemas sin necesidad de su construcción efectiva y operación real.
- En sistemas complejos permite identificar las variables más importantes.
- Permite estudiar los efectos de ciertos cambios en la operación de un sistema.
- Permite optimizar el proceso, ya que se pueden hallar las condiciones necesarias para alcanzar el mejor resultado en una situación dada

- Permite ensayar nuevas políticas en la operación de un sistema.
- Permite verificar o controlar soluciones analíticas.
- Puede ser usada para entrenamiento de personal.
- Puede ser usada como recurso pedagógico.

4.1 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA CALDERA PIROTUBULAR

La simulación desarrollada tiene como objetivos aumentar la comprensión del proceso de generación de vapor en una caldera pirotubular y mostrar como uno o varios cambios en las diferentes variables de operación (presión, flujo de vapor, tipo de control) pueden afectar su desempeño.

En la simulación se puede observar como opera el control de presión de la caldera, el control del nivel es implícito, debido a que el flujo de agua es igual al vapor generado, lo cual mantendrá el nivel de agua constante, como se vera mas adelante.

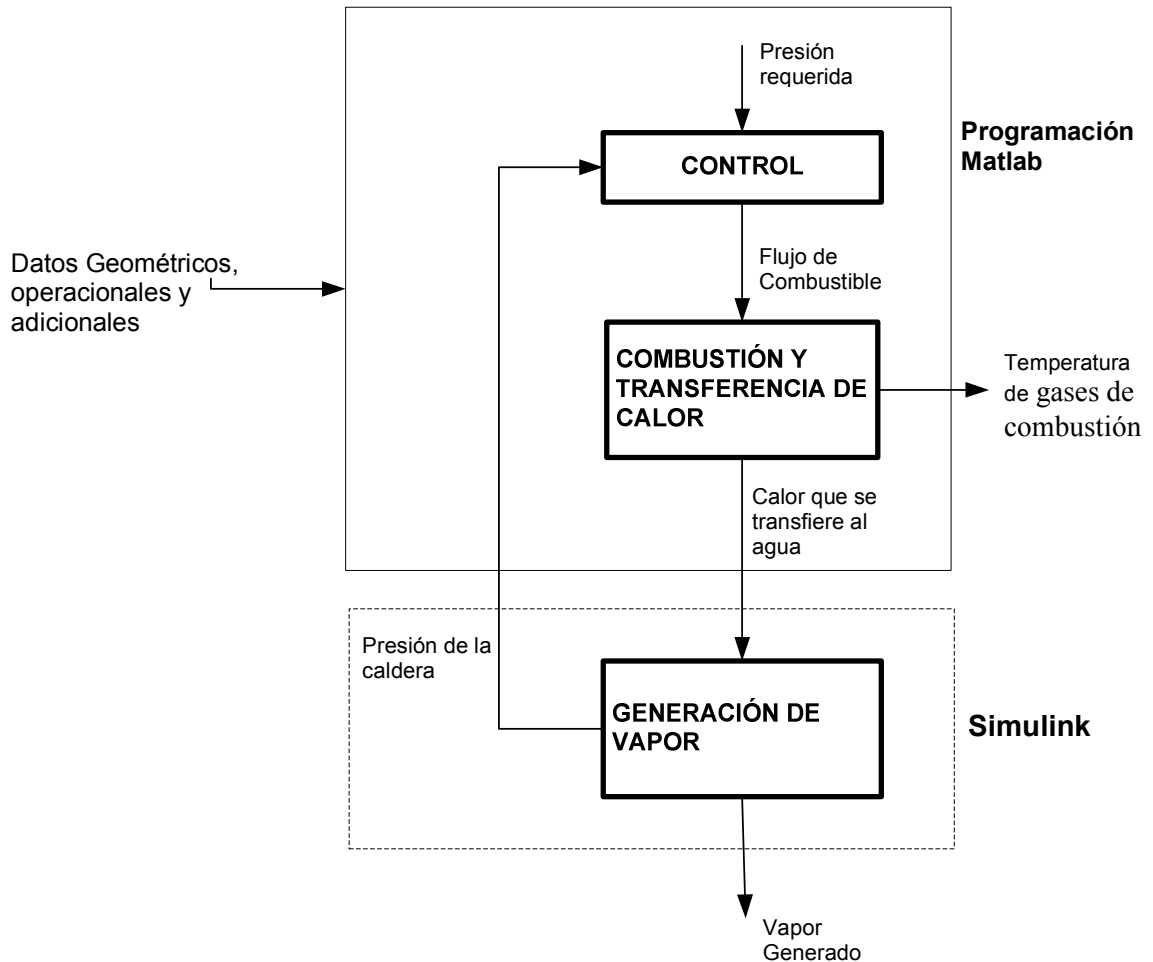
La simulación se basa en tres modelos que describen el proceso de conversión energética en una caldera pirotubular, estos son:

- Control.
- Combustión y transferencia de calor.
- Generación de Vapor.

El programa de computador se realizo en el software Matlab 7.0; la solución de las ecuaciones utilizadas en el modelo de generación de vapor se lleva a cabo en simulink.

La Figura 66 muestra la estructura general del programa y variables que relacionan entre si a cada modelo.

Figura 66. Estructura de la simulación.



4.1.1 Modelos matemáticos Los modelos matemáticos desarrollados son sencillos y se construyeron a partir de los principios básicos de termodinámica y transferencia de calor, que son suficientes para alcanzar los objetivos planteados en la simulación.

Los modelos matemáticos se desarrollaron teniendo en cuenta las siguientes consideraciones.

- La combustión es completa y con transferencia de calor.
 - Los gases entran a la cámara de combustión a las condiciones de referencia (1atm – 25° C).
 - La combustión inicia a la salida del quemador y termina al final del hogar.
 - La temperatura de los gases es constante a lo largo del hogar.
 - El programa restringe el uso de excesos de aire entre un 5% y 15%.
 - La transferencia de calor en los tubos secundarios se realiza a través de pequeños diferenciales, en estos diferenciales se asume que la temperatura de los gases y de la superficie del tubo es constante.
 - La pared interna de los tubos es lisa.
 - El flujo a través de los tubos tiene hidrodinámica y transferencia de calor totalmente desarrolladas.
 - La temperatura interna y externa del tubo es aproximadamente igual, debido a que la conductividad de este es grande.
- **Modelo matemático de control.** El modelo de control es el encargado de mantener la operación de la caldera en condiciones estables y seguras cada vez que esta se prenda o se realice una perturbación sobre ella. En la simulación se utilizan dos estrategias de control continuo y on-off, que son en esencia semejantes a las utilizadas en un sistema real.

- **Control continuo.** La acción de control utilizada fue la PI (proporcional integral), ya que esta resulto suficiente para mantener la estabilidad del sistema ante las perturbaciones generadas (cambios en el flujo de vapor o la presión).

El control se efectúa a través de la comparación de la presión actual de la caldera con la requerida y determina un error que representa la diferencia entre el valor medido y el valor deseado, en relación a este error el control determina el flujo de combustible requerido para disminuir el error (figura 67). Las ecuaciones que describen el control PI son las siguientes:

$$\dot{m}_f = C_p + C_i \quad (4.1)$$

$$C_p = K_p * error$$

$$C_i = C_i + K_i * error$$

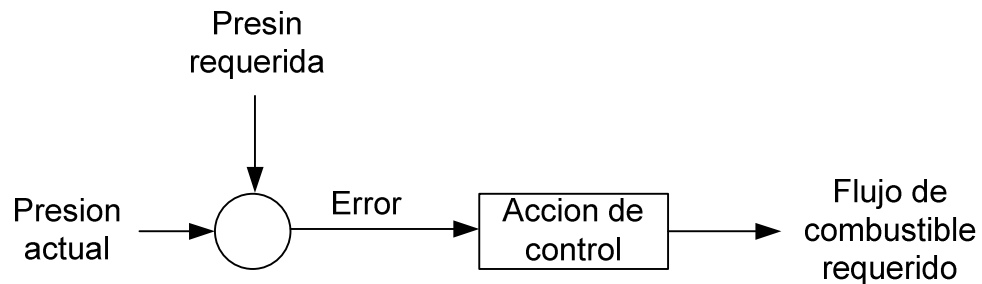
\dot{m}_f = flujo de combustible requerido (acción de control)

K_p = Ganancia proporcional.

K_i = Ganancia integral.

Un esquema sencillo de la acción de control se puede ver en la siguiente figura:

Figura 67. Control continuo

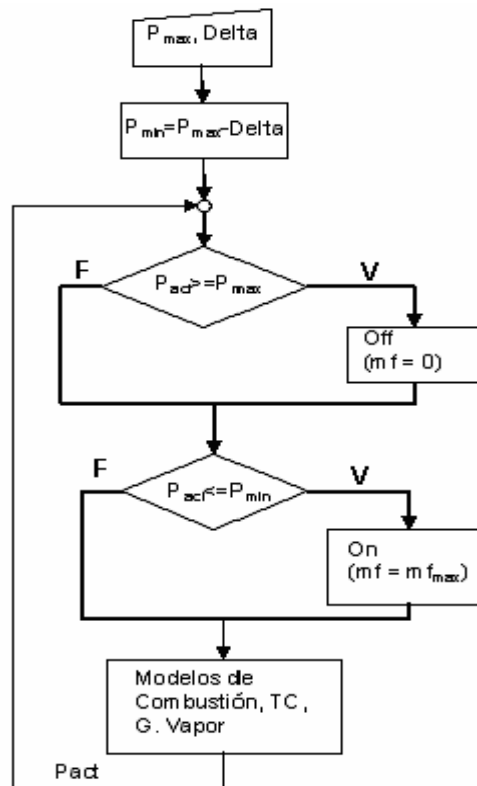


El ajuste de las ganancias proporcional K_p , integral K_i , para el controlador automático PI se hizo por prueba y error buscando la mejor respuesta por parte del sistema a posibles perturbaciones generadas por cambios en el flujo de vapor.

- **Control on-off.** Como se explico en capítulos anteriores, a través de esta estrategia de control, se busca que la caldera se mantenga operando entre una presión máxima y una mínima. La presión mínima se obtiene con la diferencia entre la presión máxima y el delta de presión:

$$P_{\min} = P_{\max} - \Delta P \quad (4.2)$$

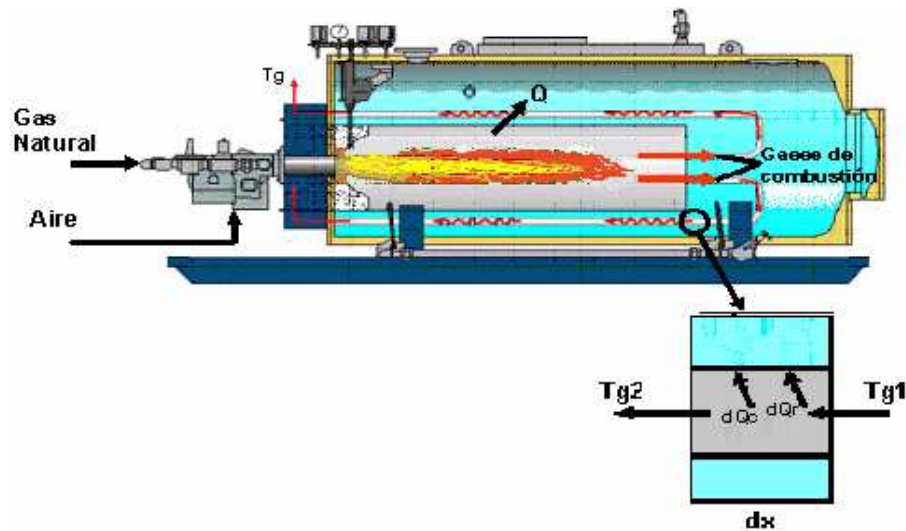
Figura 68. Diagrama de flujo del control on-off



Si la presión en la caldera alcanza la presión máxima el flujo de combustible se hace igual a cero, cuando la presión alcanza la presión mínima el flujo de combustible se hace máximo, lo anterior se puede observar en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 68.

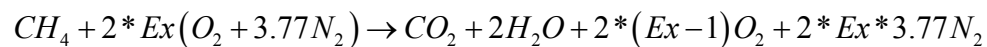
➤ **Modelo de combustión y transferencia de calor.** A través de este modelo se obtiene el calor que se transfiere al agua a partir de la combustión. El esquema que representa el modelo de combustión y transferencia de calor se muestra en la figura 69.

Figura 69. Modelo general de combustión y transferencia de calor.

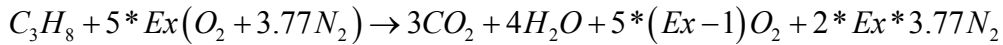


▪ **Combustión.** Se inicia con el balance de las ecuaciones de combustión de cada uno de los combustibles utilizados:

Metano:



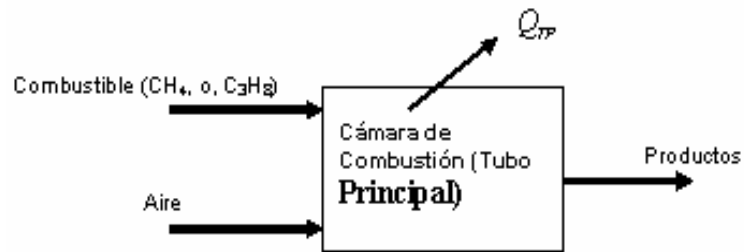
Propano:



Ex = Exceso de aire.

Para el cálculo de la temperatura de los gases en el tubo principal se utiliza la primera ley de la termodinámica para un sistema reactivo (figura 70):

Figura 70. Modelo de combustión



$$H_r = \sum H_p + Q_{TP} \quad (4.3)$$

H_r = Entalpía de los reactivos (Metano-aire, Propano-aire).

H_p = Entalpía de los productos (Gases de combustión).

Q_{TP} = Calor transferido al agua en el tubo principal.

En donde la entalpía de los productos se obtiene de la siguiente ecuación:

$$H = n_{gas} * (h_{gas(T)} - h_{ref} + h_{for.}) \quad (4.4)$$

$h_{gas(T)}$ = Entalpía del gas a la temperatura que se encuentra

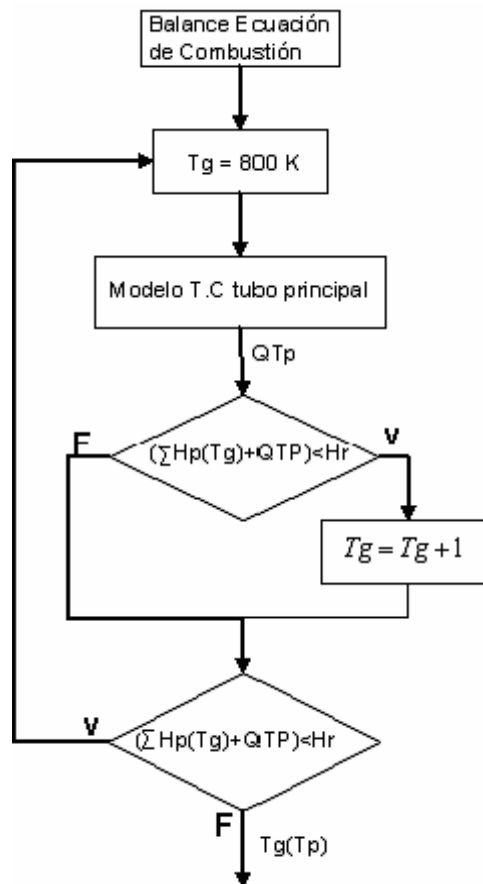
h_{ref} = Entalpía de referencia del gas (25° C).

h_{for} = Entalpía de formación del gas

n_{gas} = Numero de moles del gas

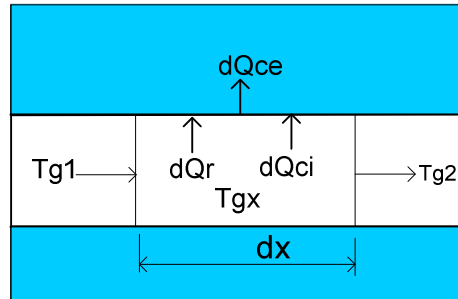
La estrategia utilizada para el cálculo de esta temperatura se puede observar en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 71. Diagrama de flujo para el calculo de la temperatura de los gases en el tubo principal.



- **Transferencia de calor.** La transferencia de calor comprende 3 aspectos que son básicamente:

Figura 72. Transferencia de calor en un diferencial en un tubo secundario.



- ✓ Radiación de los gases de combustión.
- ✓ Transferencia de calor por convección al interior del tubo.
- ✓ Transferencia de calor por convección en el exterior del tubo.

En la figura 72 se muestra la transferencia de calor en un diferencial de un tubo secundario, en el tubo principal se tiene en cuenta la longitud completa de este.

- **Radiación.** Las ecuaciones utilizadas para el cálculo del calor transferido por radiación entre los gases de combustión y la superficie del tubo son las siguientes

$$dQ_r = \frac{\pi * dx * Dt * (\epsilon_g * E_{bg} - E_{bs})}{\epsilon_s + a_g - \epsilon_s * a_g} \quad (4.5)$$

dQ_r = Calor transferido por radiación en un diferencial.

dx = Diferencial de longitud del tubo.

Dt = Diámetro del tubo.

ε_g = Emisividad de la mezcla de gases de combustión.

ε_s = Emisividad de la superficie del tubo.

E_{bg} = Poder emisivo de la mezcla de gases.

E_{bs} = Poder emisivo de la superficie del tubo.

a_g = Absortividad de la mezcla de gases

El poder emisivo se obtiene de la ecuación de Stefan-Boltzmann que se usa en la mayoría de los cálculos de radiación.

$$E = \sigma * T^4 \quad (4.6)$$

T = Temperatura de los gases o de la superficie según corresponda.

σ = Es una constante que es igual a $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$

▪ **Convección en el interior del tubo.** Las ecuaciones utilizadas en este caso son las siguientes:

$$dQc_i = \pi * dx * Dt * hi * (T_{gx} - T_s) \quad (4.7)$$

dQc = Calor transferido por convección en un diferencial.

hi = Coeficiente de transferencia de calor por convección de los gases de combustión

T_{gx} = Temperatura de los gases en el diferencial.

T_s = Temperatura de la superficie (Tubos).

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se usa la siguiente ecuación:

$$hi = \frac{K * Nu_D}{Dt} \quad (4.8)$$

K = Conductividad del fluido.

Nu_D = Numero de Nusselt para flujo a través de tubos

El cálculo del número de Nusselt para flujo turbulento se realiza a través de la ecuación de Gnielinski:

$$Nu_D = \frac{(f/8) * (Re_D - 1000) * Pr}{1 + 12.7 * (f/8)^{1/2} * (Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.9) \quad \text{Valida para } 3000 < Re_D < 10^6$$

Pr = Numero de Prandtl

f = Factor de fricción, se obtiene de la ecuación de Petukhov:

$$f = (0.790 * \ln(Re_D) - 1.64)^{-2} \quad \text{Valida para flujo turbulento}$$

Re_D = Numero de Reynolds:

$$Re_D = \frac{4 * \dot{m}_g}{\pi * Dt * \mu} \quad (4.10)$$

\dot{m}_g = Flujo másico de gases

μ = Viscosidad dinámica

Para flujo laminar se utiliza la ecuación de Hausen:

$$Nu_D = 3.66 + \frac{0.065 * (Dt/dx) * Re_D * Pr}{1 + 0.04 * [(Dt/dx) * Re_D * Pr]^{2/3}} \quad (4.11)$$

El calor transferido al agua por diferencial es la suma del calor transferido por convección y radiación.

$$dQ_x = dQc_i + dQr \quad (4.12)$$

El calor total transferido es la sumatoria de los calores transferidos en cada diferencial.

$$Q_T = \sum dQ_x \quad (4.13)$$

▪ **Convección en el exterior del tubo.** El calor que se transfiere en el exterior del tubo es aproximadamente igual al calor transferido en el interior del tubo:

$$dQ_x = dQc_e \quad (4.14)$$

Entonces:

$$dQx = \pi * dx * Dt * he * (T_s - T_{sat}) \quad (4.15)$$

En donde:

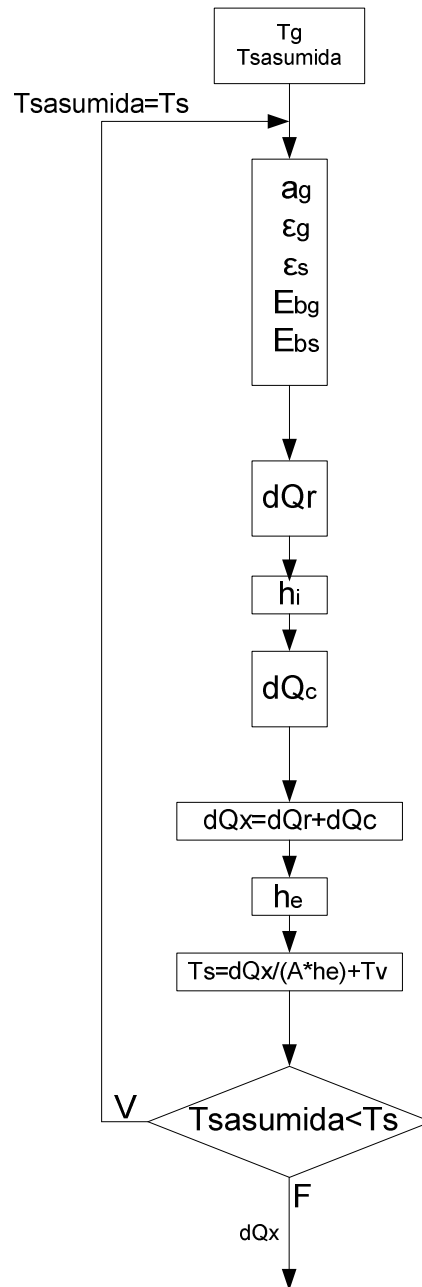
T_{sat} = Temperatura de saturación del agua.

he = Coeficiente de transferencia de calor del agua.

A partir de esta ecuación se obtiene la temperatura de la superficie del tubo (T_s).

La estrategia seguida para obtener este valor se puede apreciar en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 73. Diagrama de flujo del modelo de transferencia de calor.



Para calcular el número de Nusselt se utiliza el modelo de convección natural sobre un cilindro horizontal, si la temperatura del agua es menor de 100°C; para

temperaturas mayores se utiliza el modelo de ebullición nucleada, las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

- *Ecuaciones para el caculo del número de Nusselt por convección natural.*

$$Nu_D = 0.36 + \frac{0.518 * Ra_D^{1/4}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16}\right]^{16/9}} \quad (4.16) \text{ Valida para, } 10^{-4} < Ra_D \leq 10^9$$

$$Nu_D = \left\{ 0.6 + 0.387 * \left[\frac{Ra_D}{\left[1 + (0.469 / Pr)^{9/16}\right]^{16/9}} \right]^{1/6} \right\}^2 \quad (4.17) \text{ Valido para, } Ra_D > 10^9$$

En donde:

$$Ra_D = \frac{\beta * (T_s - T_{sat}) * g * D^3 * Pr}{\nu^2} \quad (4.18)$$

Ra_D = Numero de Rayleigh

β = Coeficiente de dilatación volumétrica

g = Gravedad de la tierra

ν = Viscosidad cinemática

El coeficiente de transferencia de calor se calcula en este caso a partir de la Ecuación 4.8.

- *Ecuaciones para el caculo del número de Nusselt por ebullición nucleada.*

$$Nu = \frac{Jal^2}{0.013^3 * Pr_l^2} \quad (4.19)$$

En donde:

$$J_{al} = \frac{C_{pl} * (T_s - T_{sat})}{h_{fg}} \quad (4.20)$$

J_{al} = Numero de Jacob.

C_{pl} = Calor especifico

h_{fg} = Entalpía de vaporización.

El coeficiente de transferencia de calor se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$h_e = \frac{Nu * k}{L_c} \quad (4.21)$$

En donde:

$$L_c = \left[\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v) * g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.22)$$

L_c = Longitud característica de la burbuja.

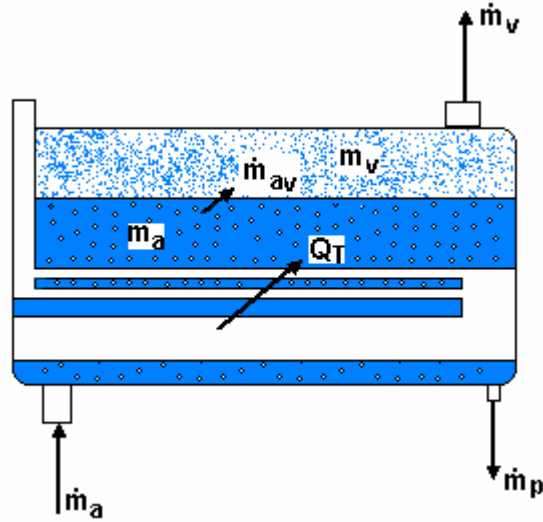
σ = Tensión superficial.

ρ = Densidad, los subíndices l y v indican la fase líquida y vapor, respectivamente

g = gravedad de la tierra.

➤ **Generación de vapor.** De este modelo se obtiene el vapor generado y la presión en la caldera a partir del calor transferido al agua contenida en esta, aplicando los principios de conservación de masa y energía.

Figura 74. Generación de Vapor



- **Balance de energía.** En este caso, se emplea la relación estándar dada por la primera ley de la termodinámica “lo que entra menos lo que se sale es igual a lo que se acumula” (Figura 74).

$$\dot{m}_a(t)h_{aw}(T_a(t)) + Q_{T(t)} - \dot{m}_p(t) * h_a(T(t)) - \dot{m}_v(t)h_v(T(t)) = \frac{d \left[h_a(T(t))m_a(t) + h_v(T(t))m_v(t) \right]}{dt} \quad (4.23)$$

Desarrollando la derivada de la parte derecha de la se obtiene la tasa de acumulación de energía.

$$\dot{m}_a(t)h_{aw}(T_a(t)) + Q_{(t)} - \dot{m}_p(t) * h_a(T(t)) - \dot{m}_v(t) h_v(T(t)) = h_a(T(t)) \frac{dm_a(t)}{dt} + m_a(t) \frac{dh_a(T(t))}{dt} + h_v(T(t)) \frac{dm_v(t)}{dt} + m_v(t) \frac{dh_v(T(t))}{dt} \quad (4.24)$$

Donde

$$\frac{dh_a(T_{(t)})}{dt} = \frac{\partial h_a}{\partial T} \frac{dT}{dt} \quad ; \quad \frac{dh_v}{dt} = \frac{\partial h_v}{\partial T} \frac{dT}{dt}$$

h_a = Entalpía de la fase líquida en la caldera

m_a = Masa de agua en la caldera

h_v = Entalpía de la fase vapor en la caldera

m_v = Masa de vapor en la caldera

\dot{m}_a = flujo másico de agua de alimentación

h_{aw} = Entalpía del agua de alimentación

Q_T = Calor transferido al agua

\dot{m}_v = Flujo másico de vapor

\dot{m}_p = Flujo másico de purga

T = Temperatura de saturación agua-vapor

T_a = Temperatura del agua de alimentación.

▪ **Balance de masa.** Esta dado por dos relaciones, la primera de la masa de agua y la segunda de la masa de vapor (Figura 74):

$$dm_a = \dot{m}_a dt - \dot{m}_{av} dt \quad \Rightarrow \quad \frac{dm_a}{dt} = \dot{m}_a - \dot{m}_{av} \quad (4.25)$$

$$dm_v = \dot{m}_{av} dt - \dot{m}_v dt \quad \Rightarrow \quad \frac{dm_v}{dt} = \dot{m}_{av} - \dot{m}_v \quad (4.26)$$

Donde, \dot{m}_{av} es la cantidad de agua que se convierte en vapor por unidad de tiempo (vapor generado).

El volumen total de la caldera se puede expresar por:

$$V_T = m_v * v_v + m_a * v_a \quad (4.27)$$

Donde:

V_T = Volumen total de la caldera

v_v = Volumen específico de vapor

v_a = Volumen específico de agua líquida

Derivando se obtiene:
$$v_v \frac{dm_v}{dt} + m_v \frac{dv_v}{dt} = -v_a \frac{dm_a}{dt} - m_a \frac{dv_a}{dt} \quad (4.28)$$

En donde:
$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{\partial v_a}{\partial T} \frac{dT}{dt} \quad \text{y} \quad \frac{\partial v_a}{\partial T} \approx 0$$

$$\frac{dv_v}{dt} = \frac{\partial v_v}{\partial T} \frac{dT}{dt}$$

▪ **Expresiones para Presión, Entalpía y volumen específico del agua en saturación.** Estas propiedades se evalúan como función de la temperatura, las expresiones utilizadas para su cálculo se obtuvieron a partir de las tablas y diagramas que contienen las propiedades termodinámicas del agua, se tomó un conjunto de puntos en el rango de 25 - 200 °C de temperatura, correspondiente al rango en el cual trabajaría la caldera, y se hizo una aproximación polinomial, las expresiones obtenidas son las siguientes:

Presión [Psig]:

$$P(T) = \left(1.41e^{-6} * T^4 - 1.4e^{-4} * T^3 + 9.37e^{-3} * T^2 + 0.29 * T - 23.1\right) * 0.145 - 14.7 \quad (4.29)$$

Entalpías [kJ/kg]:

$$h_v(T) = -4.6e^{-3} * T^2 + 2.55 * T + 2467 \quad (4.30)$$

$$h_a(T) = 1.42e^{-3} * T^2 + 3.907 * T + 14.2 \quad (4.31)$$

Volumen específico [m³/kg]:

$$v_v(T) = 2.03e^{-4} * T^2 - 0.0761358 * T + 7.2788 \quad (4.32)$$

Debido a que el volumen específico para la fase líquida varía muy poco con la temperatura se asume aproximadamente constante:

$$v_a = 1.091e^{-3} \quad (4.33)$$

▪ **Implementación en Simulink del modelo matemático.** A partir de las ecuaciones obtenidas del balance de masa y energía se crean subsistemas. Luego se interrelacionan de acuerdo a las entradas y salidas de cada uno, de tal forma que al final se obtenga el vapor generado, la temperatura del agua en saturación de la caldera y la correspondiente presión. Los subsistemas creados con sus respectivas variables de entrada y salida, y el diagrama de bloques completo se muestran en las figuras siguientes:

Figura 75. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.26

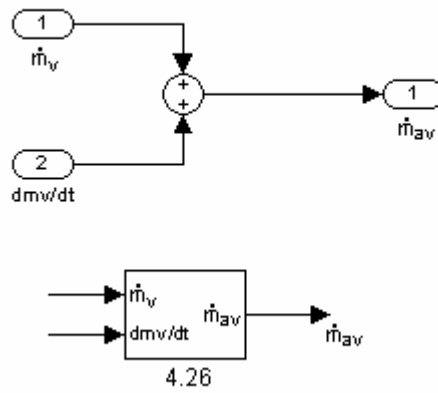


Figura 76. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.25

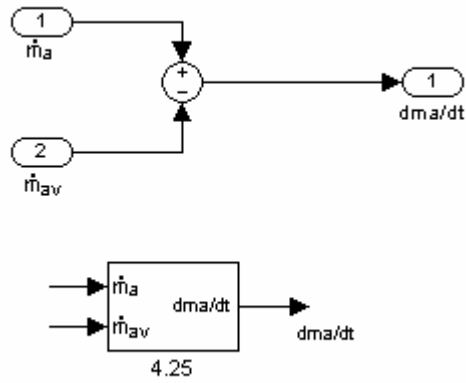


Figura 77. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.27

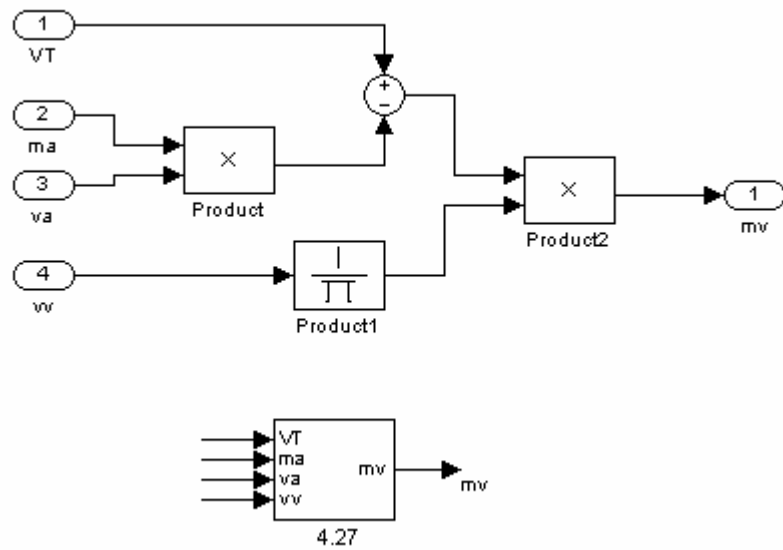


Figura 78. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.28

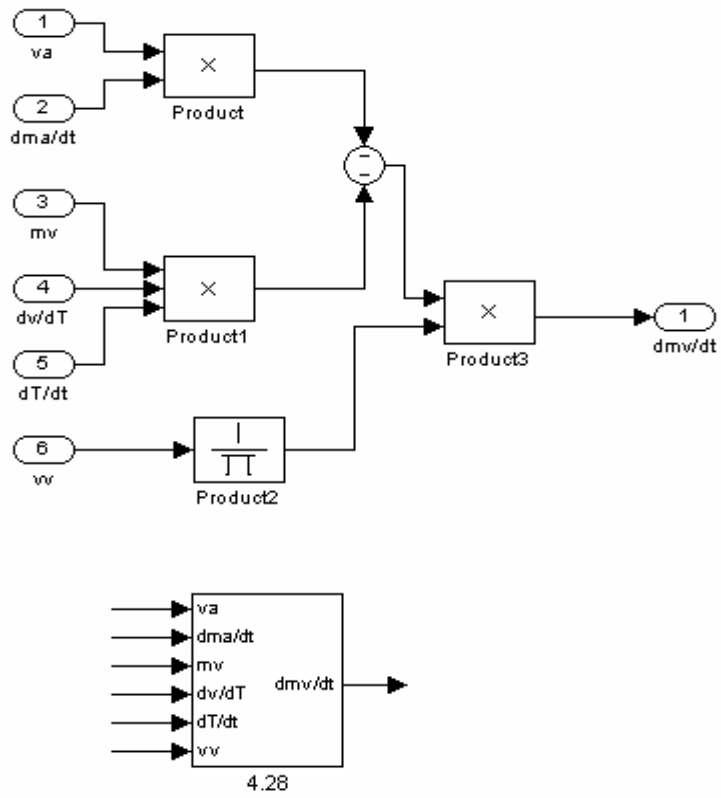


Figura 79. Subsistema creado a partir de la ecuación 4.24

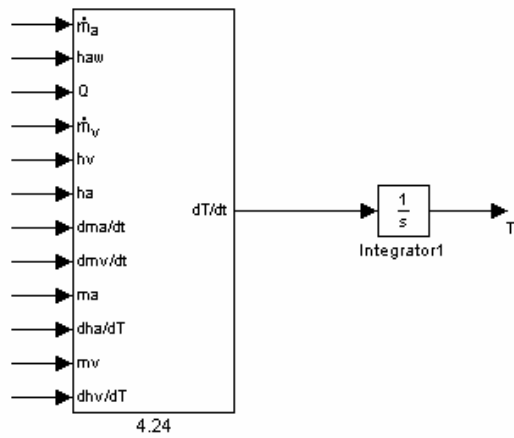
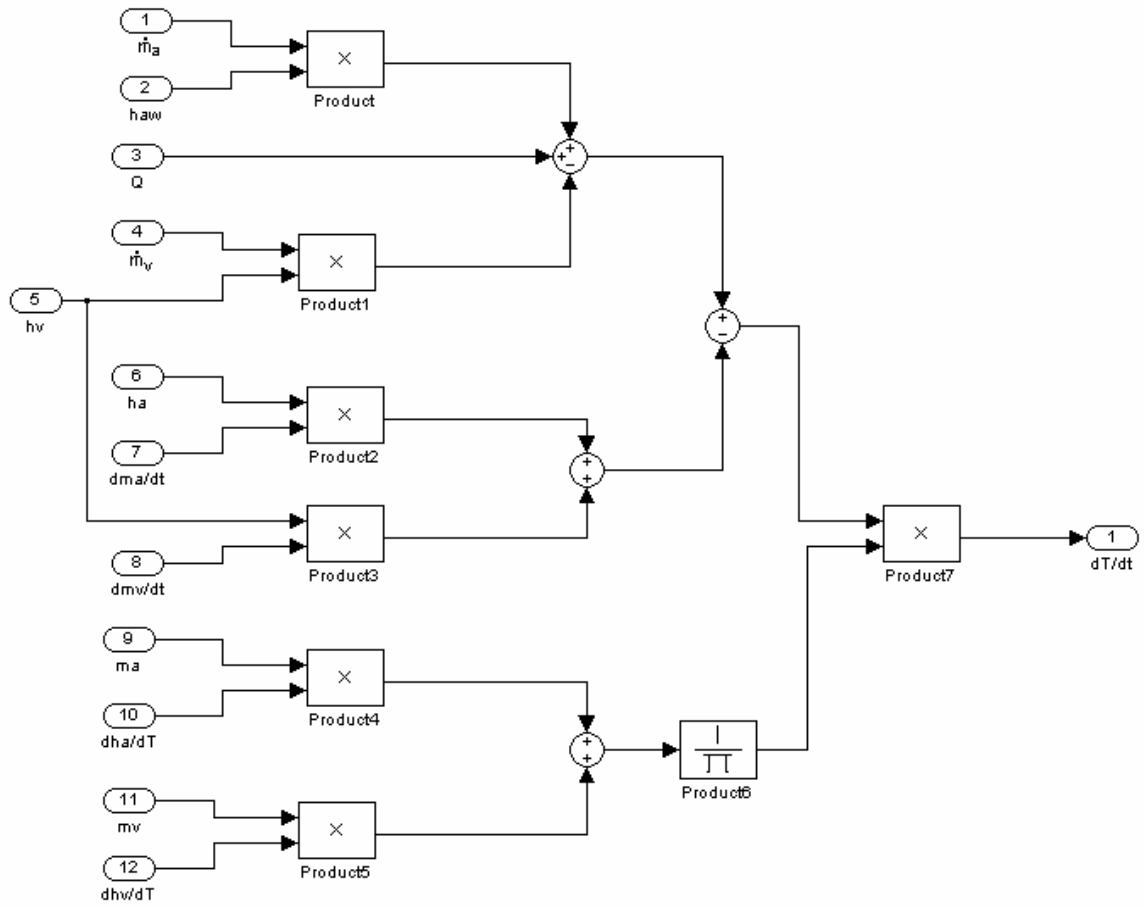
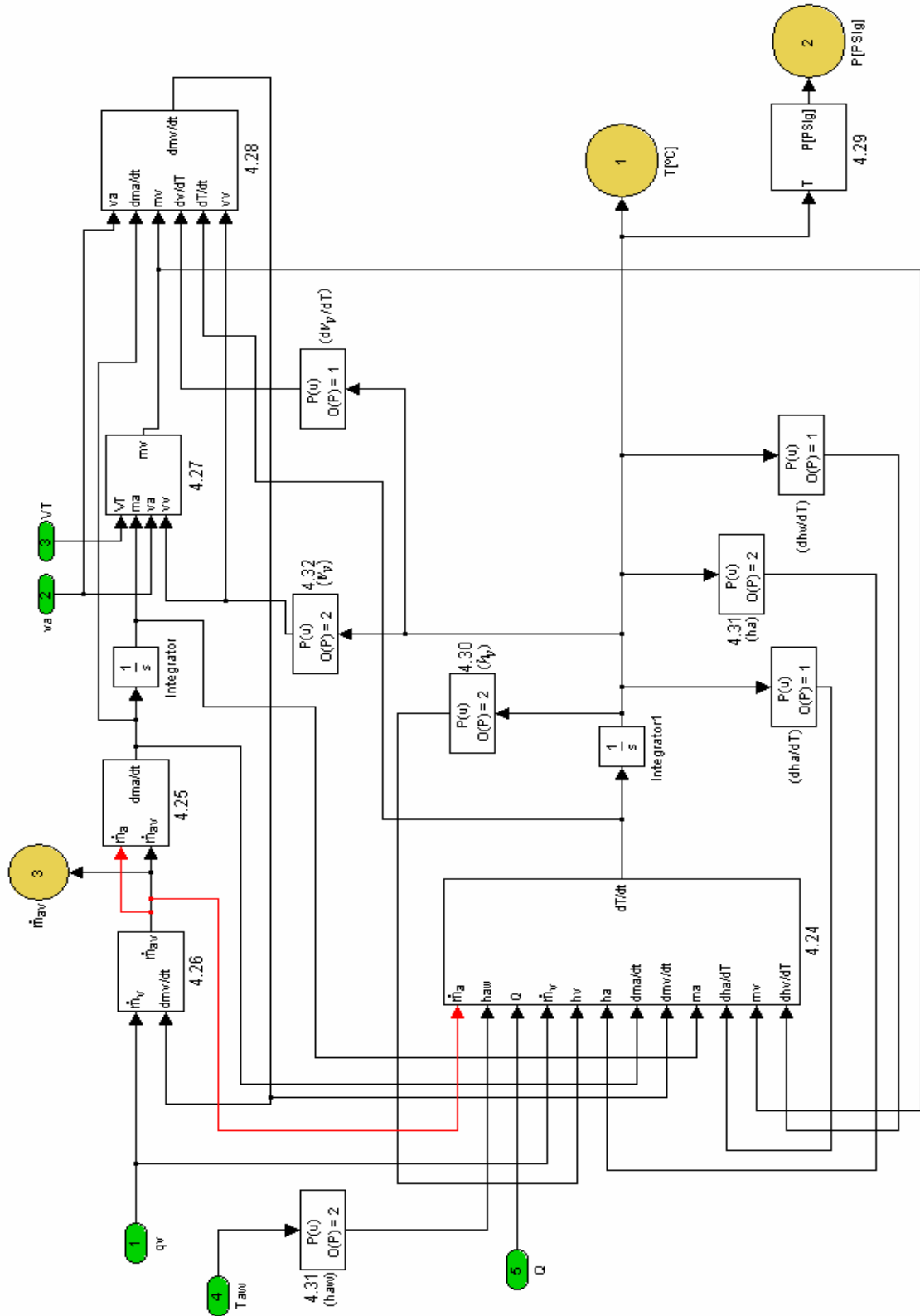


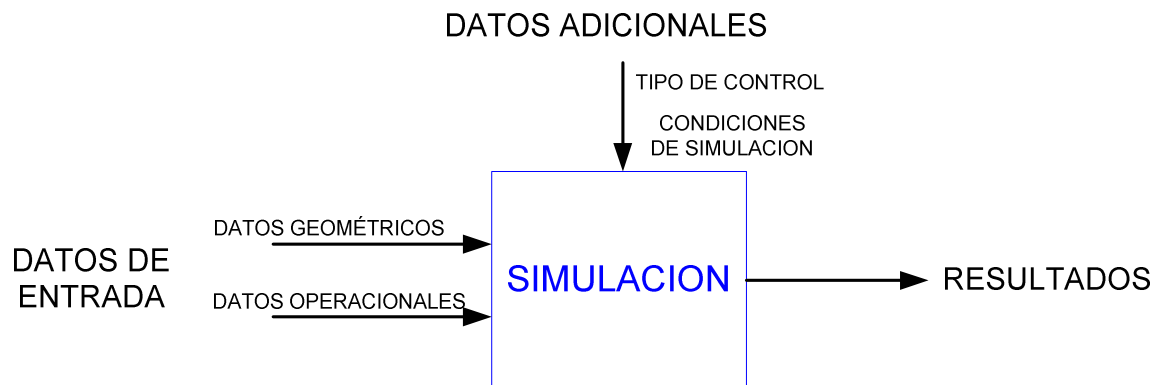
Figura 80. Diagrama de bloques completo



En el diagrama de bloques completo (Figura 80), la línea roja muestra el control de nivel “implícito” que se había mencionado anterior mente, en donde el flujo de agua de alimentación (\dot{m}_a) se mantiene igual que el vapor generado (\dot{m}_{av}), para asegurar que el nivel de agua en la caldera no varíe.

4.1.2 Requerimientos y resultados de la simulación. La simulación requiere para iniciar introducirle ciertos datos que son característicos de la caldera y del medio ambiente que la rodea, así como los requerimientos del proceso y al final entregara resultados (Figura 81).

Figura 81. Requerimientos de la simulación



➤ **Datos de entrada.** Los datos de entrada son necesarios para determinar la capacidad de la caldera y las condiciones bajo las cuales va a operar, se clasifican en:

- Datos geométricos.
- Datos operacionales.
- Datos adicionales.

- **Datos geométricos.** Definen la capacidad de la caldera y el área de transferencia de calor, estos son:
 - Diámetro del tubo principal (hogar)
 - Diámetro de los tubos secundarios
 - Numero de tubos secundarios
 - Longitud de los tubos

En la siguiente figura se muestra la ventana donde se deben ingresar estos datos.

Figura 82. Ventana en donde se ingresan los datos geométricos.



- **Datos operacionales.** Definen las condiciones bajo las cuales va a operar la caldera, estos son:
 - Combustible (Metano o Propano)
 - Temperatura ambiente
 - Exceso de aire
 - Flujo de vapor requerido
 - Temperatura del agua de alimentación

En la siguiente figura se muestra la ventana en donde se ingresan estos datos.

Figura 83. Ventana en donde se ingresan los datos operacionales.



▪ **Datos adicionales.** Definen el tipo de control y las condiciones de la simulación, estos datos son:

- Tipo de control (continuo u on-off)
- Condiciones de simulación.

Si el control es continuo las condiciones de simulación son:

- Presión de trabajo requerida.
- Presión inicial (Presión a la cual se inicia la simulación. Si inicia desde el arranque de la caldera esta será cero).
- Tiempo de simulación.

Si el control es on-off las condiciones de simulación son:

- Presión inicial.
- Presión Máxima.

- Delta de Presión.
- Tiempo de simulación.

Estos datos se ingresan en la ventana principal de simulación Figura 84

Figura 84. Ventana principal de simulación



➤ **Resultados.** Los siguientes resultados se muestran en tiempo real:

- Vapor generado.
- Presión de la caldera.
- Temperatura máxima y de salida de los gases de combustión.
- Consumo de combustible.
- Eficiencia de la caldera.
- Tiempo de simulación.

Estos se muestran en la ventana principal de simulación Figura 84.

También se mostraran los respectivos históricos de presión, consumo de combustible, eficiencia y generación de vapor. Los históricos de presión y consumo de combustible, tanto para control continuo como on-off se muestran en las figuras siguientes.

Figura 85. Histórico de presión bajo control continuo

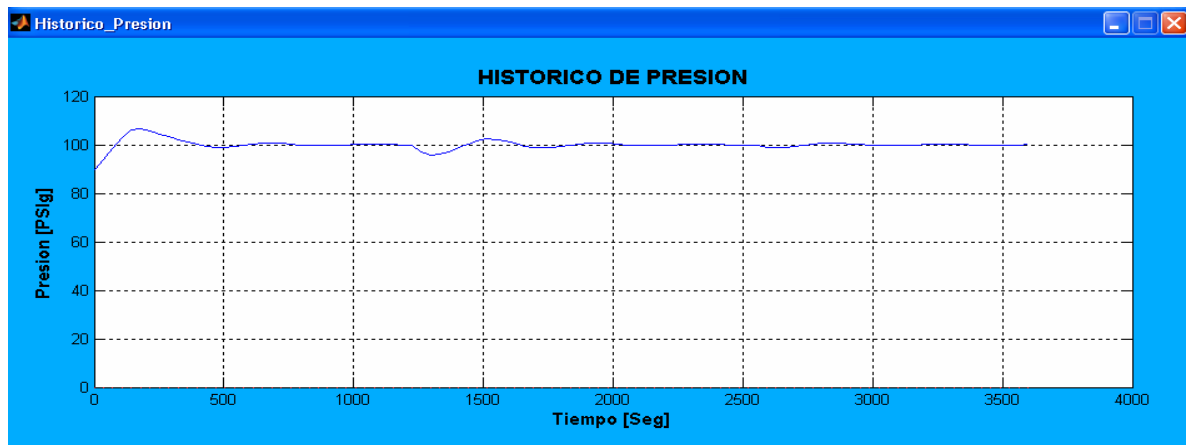


Figura 86. Histórico de consumo de combustible bajo control continuo

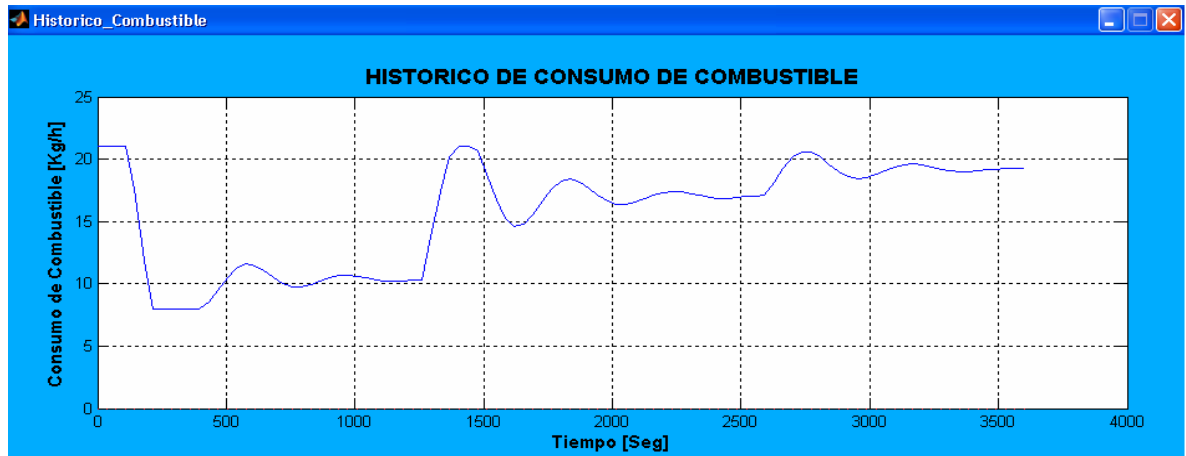


Figura 87. Histórico de presión bajo control on-off

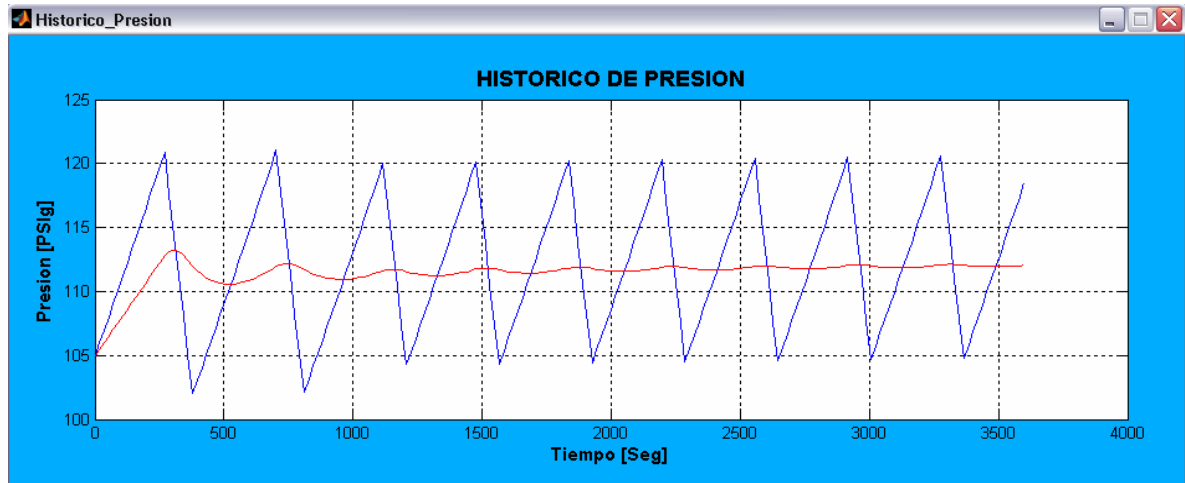
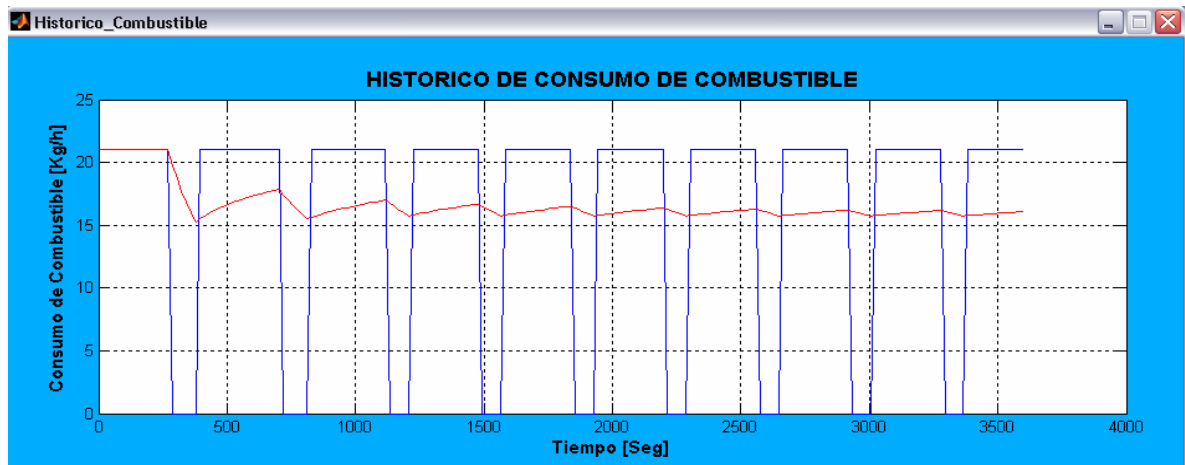


Figura 88. Histórico de consumo de combustible bajo control on-off



4.1.3 Que se puede hacer con la simulación. Esta es una simulación dinámica, en la cual se puede simular el comportamiento de una caldera pirotubular entre 20 y 100 BHP, desde el arranque o desde una presión cercana a la requerida en operación bajo control on-off o control continuo.

- **Desde el Arranque.** Para realizar la simulación desde el arranque (desde que el agua en la caldera se encuentra a temperatura ambiente), la presión inicial y el

flujo de vapor deben ser igual a cero; la simulación esta predeterminada para iniciar desde el arranque.

➤ **Desde una presión cercana a la requerida.** Para este caso, se debe definir el flujo de vapor y la presión a la cual se desea iniciar la simulación.

También permite hacer cambios durante la simulación de las variables de operación (presión, flujo de vapor, tiempo de simulación), con el fin de hacer las respectivas comparaciones y análisis de la influencia que estos cambios ejercen sobre el proceso.

4.2 RESPUESTA DE LA CALDERA A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN.

A través de la simulación se puede observar como responde el sistema ante perturbaciones introducidas las cuales pueden ser cambios en el flujo de vapor o la presión de trabajo y apreciar como afectan estos cambios a la eficiencia y al consumo de combustible. Lo anterior se puede hacer tanto para operación bajo control continuo como on-off

4.2.1 Calculo de Eficiencia. Teniendo en cuenta que la eficiencia esta definida como la relación entre el calor transferido al agua y el calor suministrado, en este caso el calculo de la eficiencia es muy sencillo, ya que la simulación obtiene directamente el calor que transferido al agua, la ecuación utilizada para el calculo de la eficiencia es:

$$\eta = \frac{Q_T}{Q_s} * 100 \quad (4.34)$$

η = Eficiencia

Q_T = Calor transferido al agua

Q_s = Calor suministrado

$$Q_s = \dot{m}_f * H_f$$

\dot{m}_f = Flujo másico de combustible

H_f = Poder calorífico del combustible

En el caso de una caldera real, no es posible medir el calor transferido al agua, es por esto, que para determinar la eficiencia hay que estimarlo, para hacer esto se utilizan principalmente dos metodologías:

- Método directo.
- Método Indirecto

En el capítulo siguiente se tratara este tema mas en detalle.

4.2.2 Respuesta del sistema ante cambios en el flujo de vapor

➤ **Bajo control continuo.** Se realizo la simulación para una presión de 100 PSlg, haciendo incrementos de flujo de vapor de 50 lb/h cada 30 min, desde 400 hasta 550 lb/h. La respuesta de sistema se muestra en las siguientes figuras:

Figura 89. Respuesta de la presión ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control continuo.

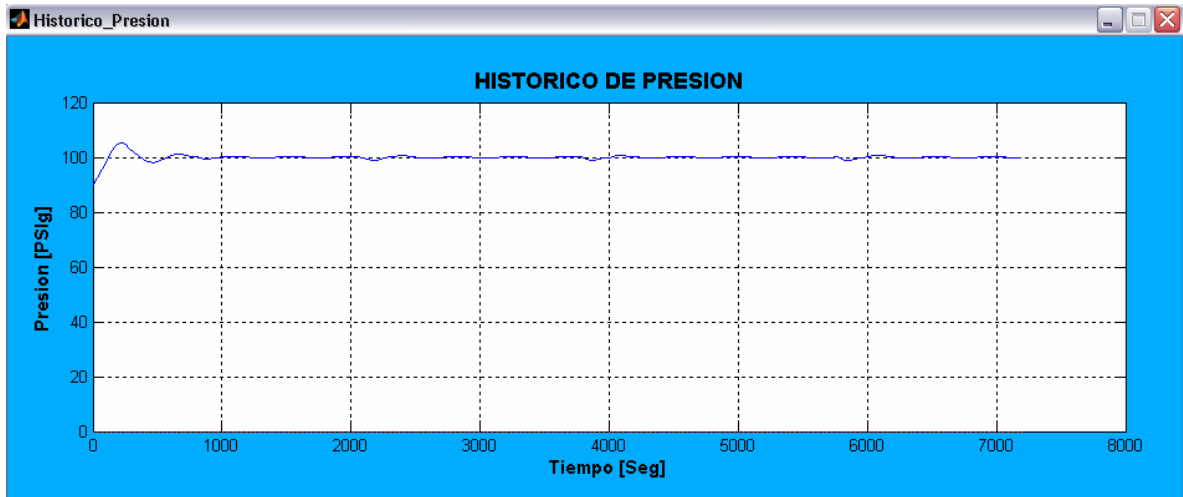


Figura 90. Respuesta del flujo de combustible ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control continuo.

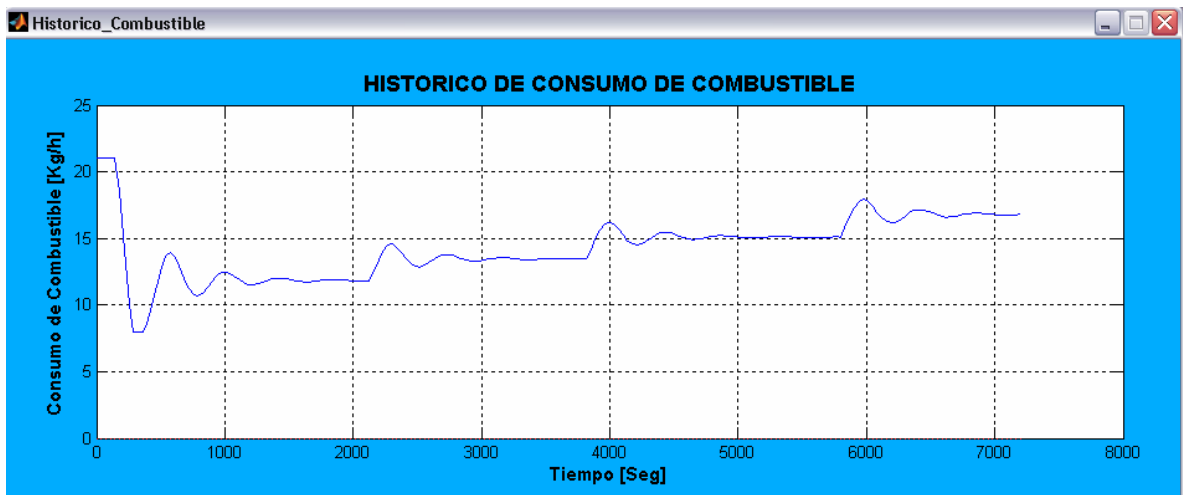


Figura 91. Respuesta de la eficiencia ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control continuo.

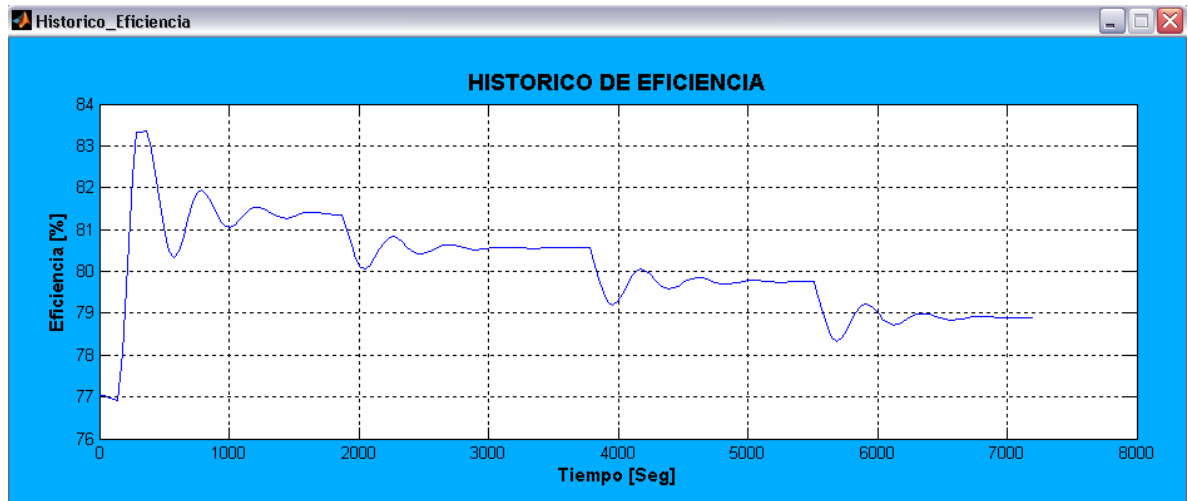
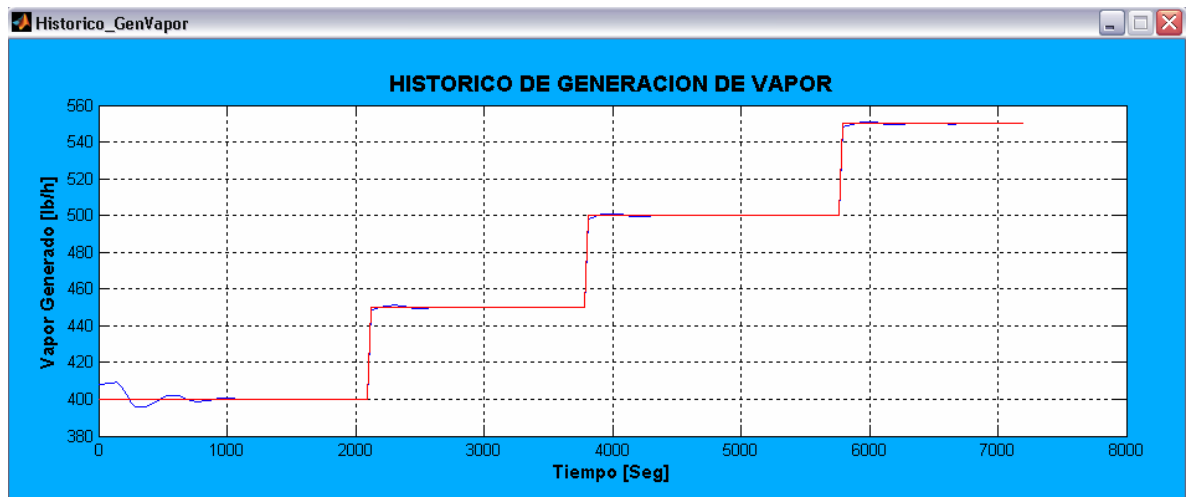


Figura 92. Respuesta del vapor generado ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control continuo.



En la Figura 90 se puede apreciar como el consumo de combustible se incrementa para mantener la presión constante, en la medida que el flujo de vapor aumenta, mientras la eficiencia disminuye (Figura 91).

En los históricos también se puede apreciar como el sistema busca nuevamente la estabilidad luego que se realiza una perturbación, en este caso el aumento del flujo de vapor.

En la figura 92 la línea azul muestra el vapor generado y la línea roja el flujo de vapor, las cuales coinciden cuando el sistema alcanza la estabilidad.

➤ **Bajo control on-off.** En este caso, la simulación se realizó para una presión máxima de 107.5 Psig y un delta de 15 Psig, de tal forma que la presión media fuera de 100 Psig. La variación de flujo de vapor se realizó igual a lo hecho para control continuo. La respuesta del sistema se muestra en las siguientes figuras:

Figura 93. Respuesta de la presión ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control on-off.

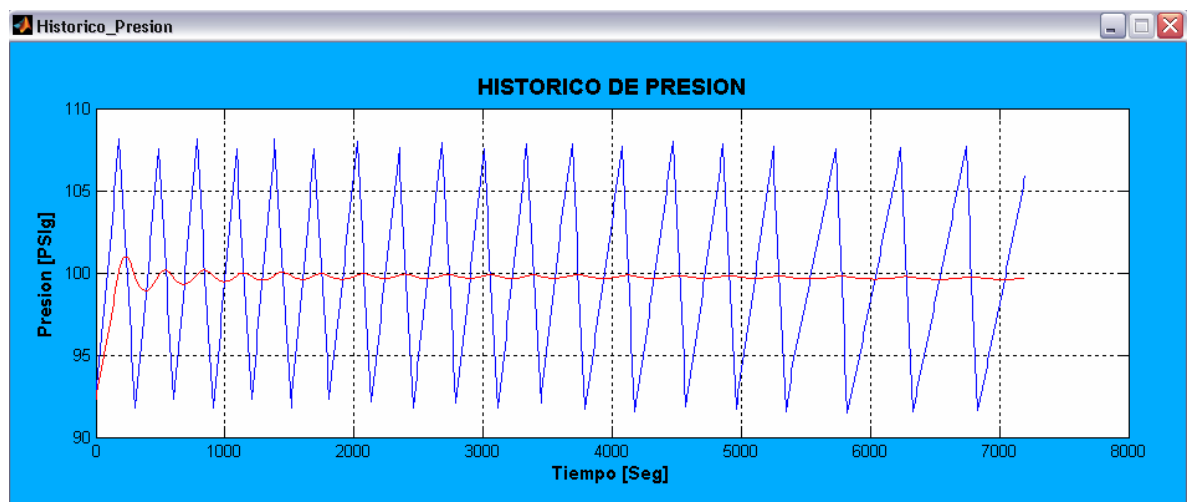


Figura 94. Respuesta del flujo de combustible ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control on-off.

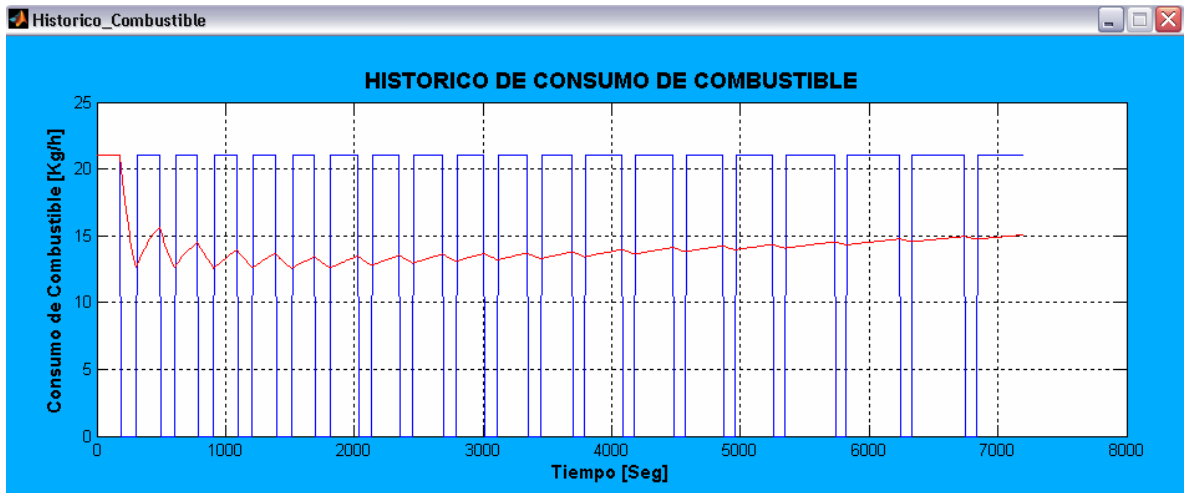


Figura 95. Respuesta de la eficiencia media ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control on-off.

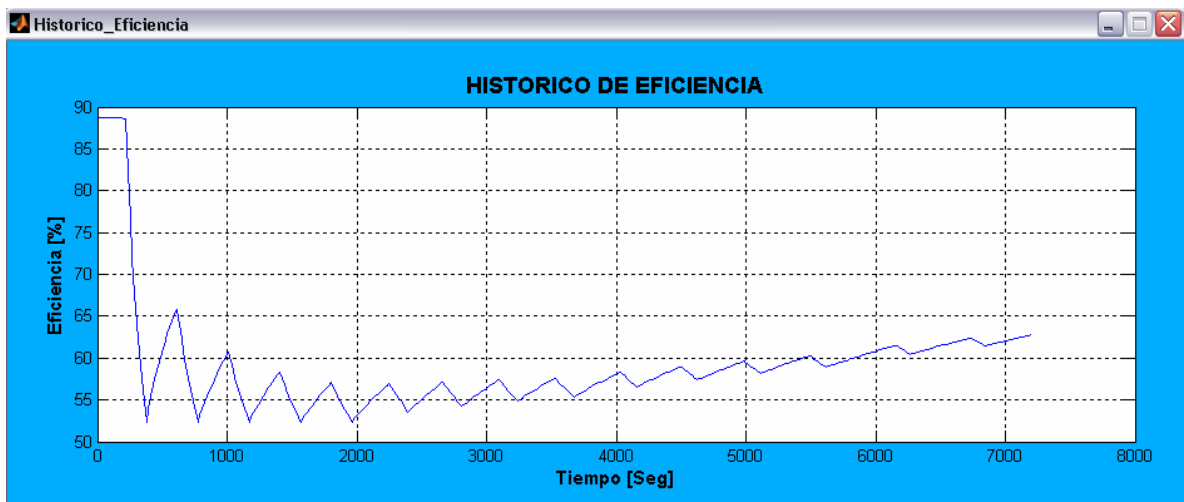
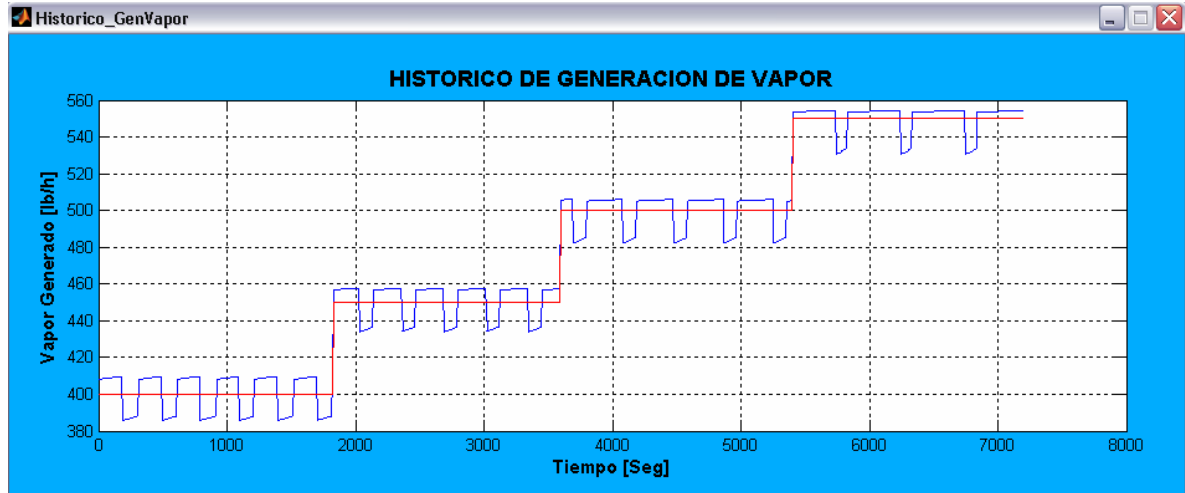


Figura 96. Respuesta del vapor generado ante cambios en el flujo de vapor, con operación bajo control on-off.



En la Figura 94 se puede apreciar que el consumo medio de combustible (línea roja en el gráfico) se incrementa y la eficiencia media aumenta (figura 95), en la medida que el flujo de vapor aumenta.

4.2.3 Respuesta del sistema ante cambios en la presión de trabajo

➤ **Bajo control continuo.** Se realizó la simulación para un flujo de vapor de 500 lb/h, haciendo incrementos en la presión de 10 Psig cada 30 min, desde 70 hasta 100 Psig. La respuesta de sistema se muestra en las siguientes figuras:

Figura 97. Respuesta del sistema ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control continuo.

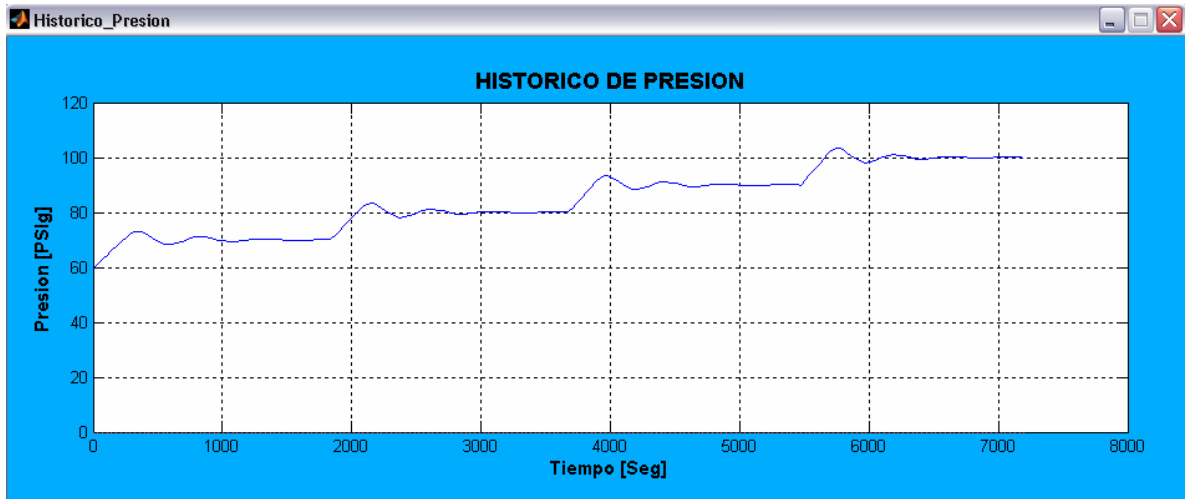


Figura 98. Respuesta del consumo de combustible ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control continuo.

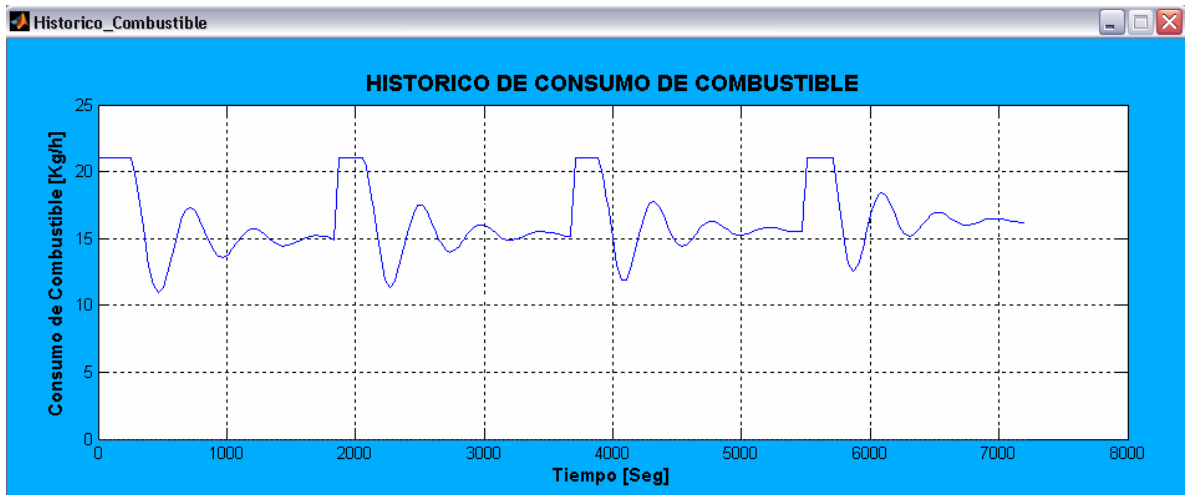


Figura 99. Respuesta de la eficiencia ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control continuo.

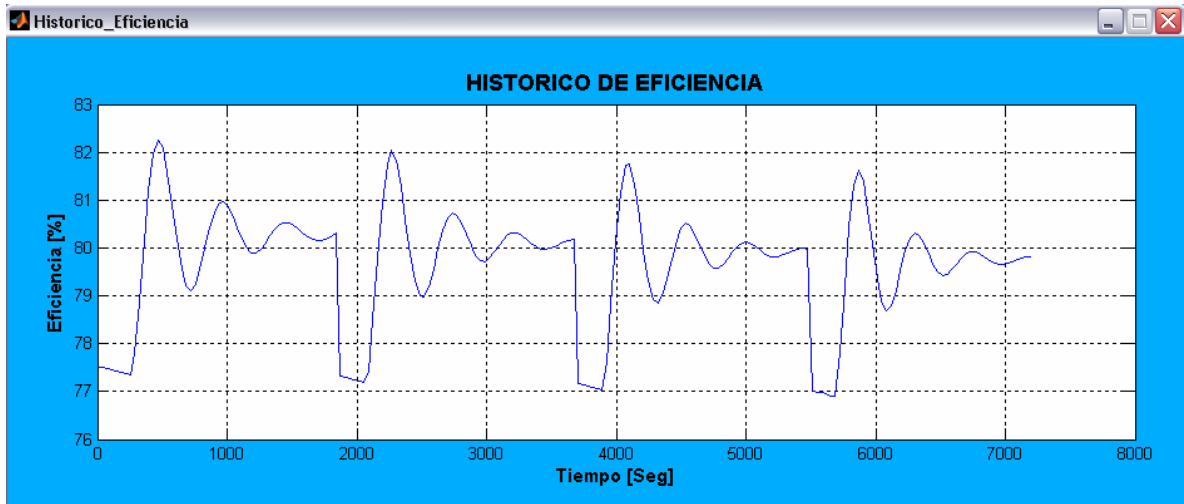
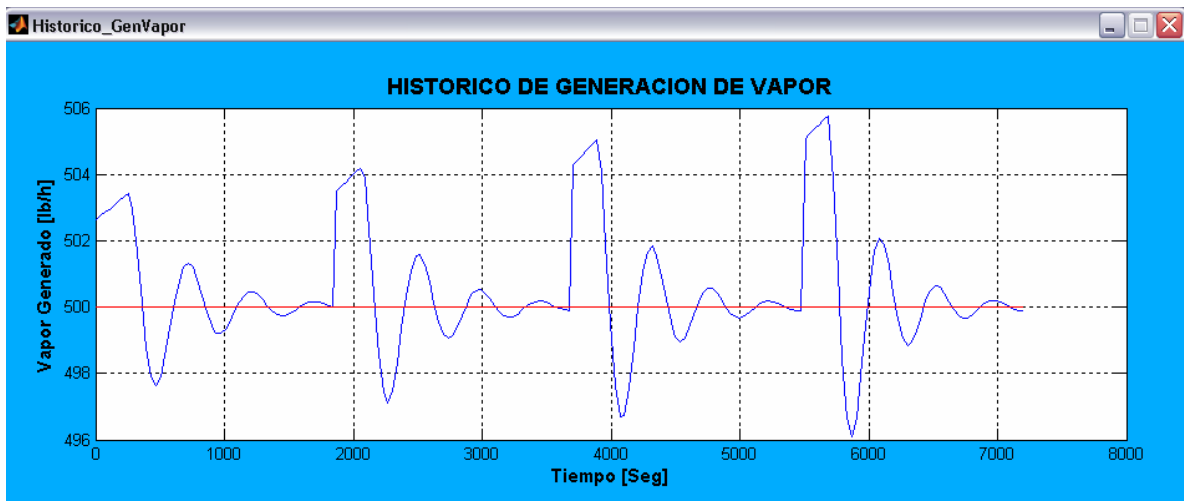


Figura 100. Respuesta del vapor generado ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control continuo.



En la Figura 98 se aprecia un leve aumento en el consumo de combustible y disminución en la eficiencia (Figura 99), en la medida que aumenta la presión.

➤ **Bajo control on-off.** Se realizó la simulación para un flujo de vapor de 500 lb/h y un delta de presión de 15Psig, haciendo incrementos en la presión máxima de 10 Psig cada 30 min, desde 77.5 hasta 107.5 Psig. La respuesta de sistema se muestra en las siguientes figuras:

Figura 101. Respuesta del sistema ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control on-off.

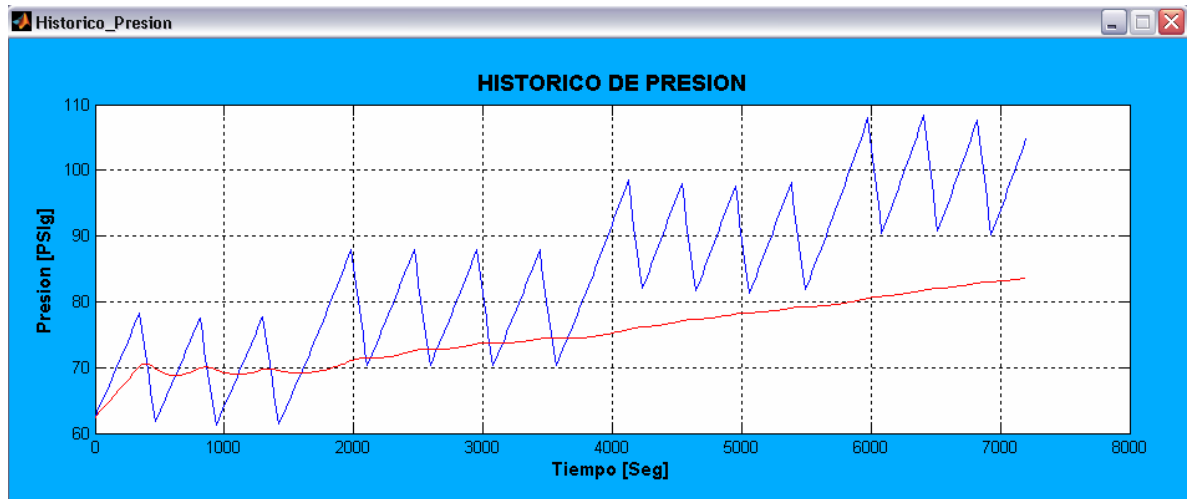


Figura 102. Respuesta del flujo de combustible ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control on-off.

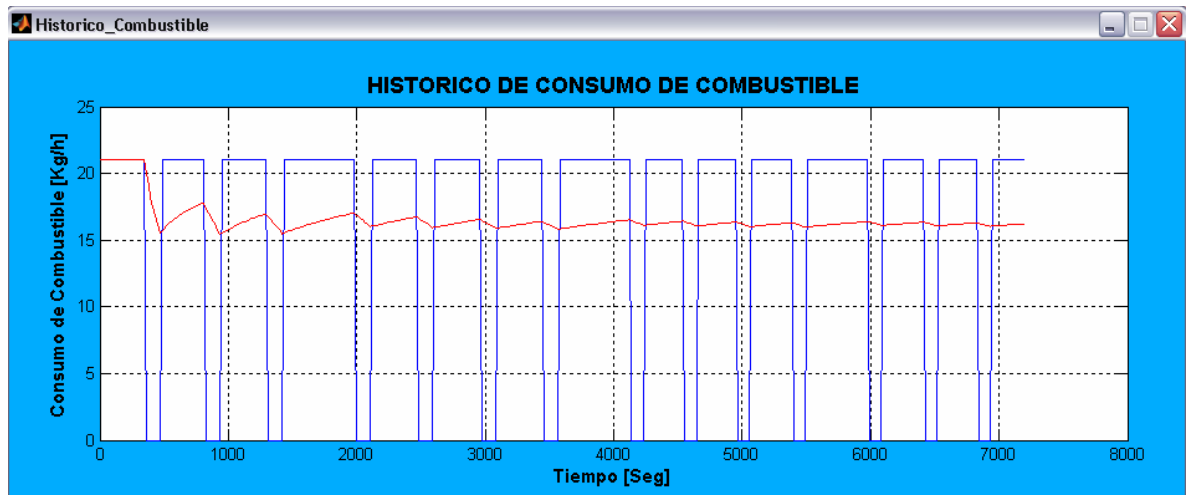


Figura 103. Respuesta de la eficiencia media ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control on-off.

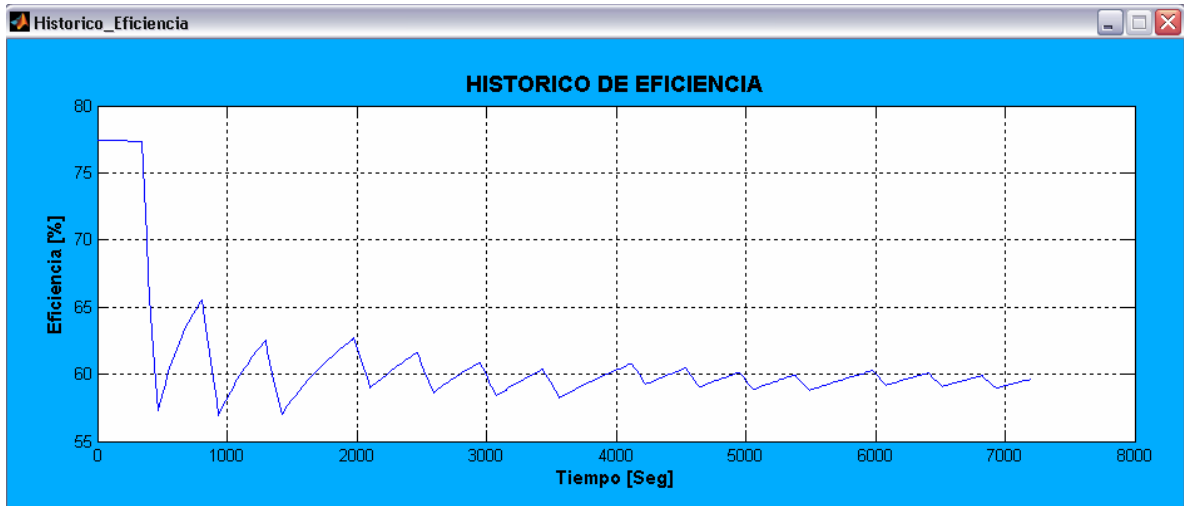
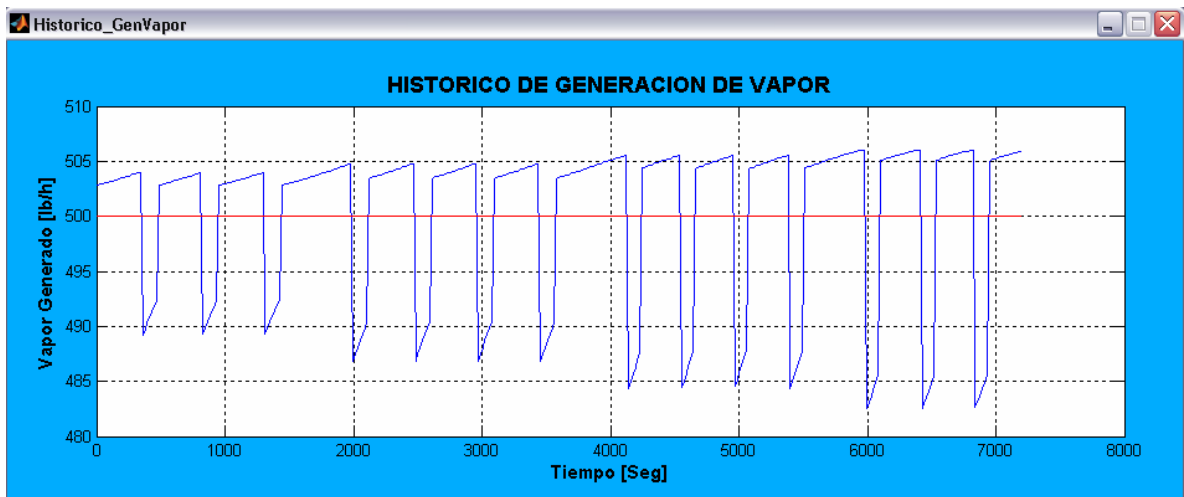


Figura 104. . Respuesta del vapor generado ante cambios en la presión de operación, con operación bajo control on-off.



En la Figura 102 se aprecia un leve aumento en el consumo medio de combustible y disminución en la eficiencia media (Figura 103) en la medida que aumenta los límites de presión.

5. EVALUACION ENERGETICA

Las calderas son una parte esencial de muchas plantas industriales, y su eficiencia, puede afectar significativamente los costos de operación, la rentabilidad y confiabilidad de la planta entera. Para conocer como se ve afectado el rendimiento de la caldera al efectuar cambios operacionales, se debe realizar una evaluación energética, determinando así las condiciones de operación optimas de la caldera, con lo cual se busca que la energía disponible se consuma de una manera eficiente, obteniendo así un ahorro potencial económico y energético, disminuyendo los impactos ambientales.

Para observar y evaluar el comportamiento energético que presenta una caldera pirotubular se realizaron pruebas directamente sobre ella. La evaluación energética se realizó teniendo en cuenta los siguientes escenarios:

- Efecto sobre la eficiencia y el consumo de combustible del cambio de flujo de vapor a una presión determinada.
- Efecto sobre la eficiencia y el consumo de combustible del cambio de presión a un flujo de vapor determinado

Lo anterior aplicado tanto para operación bajo control continuo como on-off:

5.1 EFICIENCIA DE UNA CALDERA

El grado de aptitud de una caldera, para transferir cierta cantidad de calor que recibe el agua o el vapor del hogar a partir del combustible es "la eficiencia de la

caldera". La eficiencia de una caldera es considerada como un total obtenido de la combinación de todos sus elementos componentes, que pueden ser:

- Quemador
- Hogar
- Sobrecalentador
- Economizador

5.1.1 Factores que afectan la eficiencia. La eficiencia promedio de una caldera varía entre límites muy amplios y se afecta por "factores fijos" propios de cada caldera tales como

- Diseño de la Caldera, incluyendo:
 - ✓ Disposición y efectividad de la superficie de calefacción.
 - ✓ Volumen y forma del hogar.
 - ✓ Cantidad y composición de los productos de la combustión.
 - ✓ Circulación del agua y del vapor dentro de la caldera.
- Pérdidas internas, tales como:
 - ✓ Transferencia de calor a través de las paredes de la caldera.
 - ✓ Pérdida de calor de los gases de escape y cenizas.
- Equipo integral interno de recuperación de calor, tales como:
 - ✓ Sobrecalentador.
 - ✓ Precalentador de aire.
 - ✓ Economizador.
- Tipo de combustible que se emplea y sus características inherentes.

- Liberación de calor por unidad de volumen o por unidad de superficie.
- Controlabilidad de las condiciones variables.

En una instalación dada, la eficiencia cambiará hora a hora, día a día, dependiendo de las siguientes “condiciones variables”:

- Condiciones del combustible, en el momento de ser quemado.
- El tiro, según sea afectado por la presión barométrica.
- El ajuste del sistema de combustión.
- Porcentaje de exceso de aire.
- Estado de limpieza de las superficies que transmiten calor.
- Temperatura y grado de humedad del aire para la combustión.
- Tipo de operación (continuo o intermitente).
- Tipo de sistemas de control.

5.1.2 Métodos para la determinación de la eficiencia. El valor de la eficiencia se puede determinar aplicando cualquiera de los métodos establecidos por la ASME Test Code PTC 4.1. Estos dos métodos son:

- Método directo
- Método indirecto

➤ **Método Directo.** En el método directo, la eficiencia comprende la medición de la energía de entrada (calor suministrado por el combustible) y la energía de salida (calor absorbido por el vapor),

Matemáticamente la eficiencia se calcula de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\dot{m}_v * (h_v - h_{aw})}{\dot{m}_f * H_f} \quad (5.1)$$

Donde,

H_f = Poder calorífico

Este método requiere la medición de:

- Flujo de vapor producido
- Consumo de combustible
- Temperaturas y presiones de agua de alimentación y del vapor
- Determinación del poder calorífico del combustible.

La principal ventaja de este método es la rapidez para determinar la eficiencia del equipo y que se requiere instrumentación sencilla. Su desventaja es que no se puede conocer como están operando los diferentes elementos de la caldera.

➤ **Método Indirecto.** Este método es el más ampliamente utilizado, ya que permite hacer la determinación de cada una de las pérdidas que intervienen en el balance térmico (figura 105) y evaluarlas para tomar correctivos.

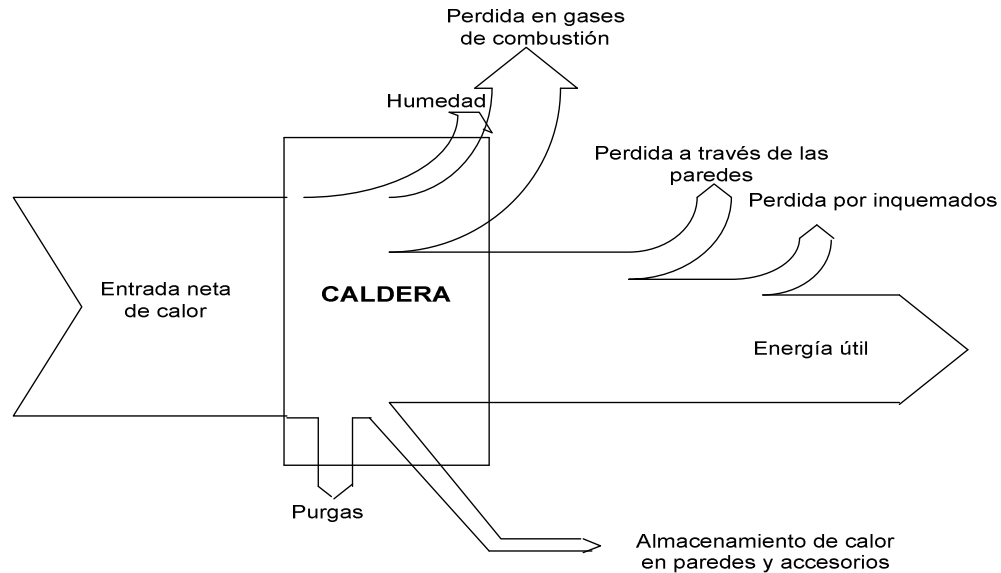
Para la determinación de las pérdidas individuales es necesario realizar las siguientes mediciones

- Temperatura y análisis de los gases (CO_2 , CO , O_2 , N_2) en la chimenea.
- Temperatura y presión del aire del ambiente
- Análisis último del combustible
- Poder calorífico del combustible
- Tiro (presión relativa) entre la caldera y la salida de la chimenea.

Luego la eficiencia será determinada mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum \text{pérdidas}}{\dot{m}_f * H_f} \right) \times 100\% \quad (5.2)$$

Figura 105. Diagrama Sankey de flujos de energía a través de la caldera.



Las pérdidas debidas a la combustión son inevitables y generalmente difíciles de determinar. Normalmente las pérdidas de calor que afectan más la eficiencia provienen de:

- Pérdidas de calor por gases de combustión, las cuales se asocian a cuatro conceptos:
 - ✓ Temperatura de los gases.
 - ✓ Presencia de hidrocarburos en los gases.
 - ✓ Formación de monóxido de carbono.
 - ✓ Presencia de material particulado.

- Perdidas de calor por humedad del combustible
- Perdidas de calor por humedad del aire.
- Perdidas por de calor a través de las paredes de la caldera.
- Perdidas debidas a purgas.

En la siguiente tabla se muestra los estándares de distribución general de pérdidas de rendimiento. La distribución depende del tipo de combustible, de las condiciones de operación y del diseño de la caldera.

Tabla 13. Distribución de pérdidas de calor en una caldera

	%
Gases de combustión a la atmósfera	8
Por combustible sin quemar	4
Por radiación y purgas	3

Fuente: Tríptico PROCEFF “Optimización de calderas y generadores de vapor”

Para el desarrollo del presente proyecto el método utilizado para determinar la eficiencia de la caldera es el directo, por la facilidad que presenta medir las variables que se requieren.

Para la medición de las variables requeridas en el cálculo de la eficiencia a través de este método se utiliza la siguiente instrumentación:

- *Para el flujo de vapor:* Platina de orificio y sensores de presión a la entrada y salida de esta; para más detalles ver capítulo tres.

- *Para la temperatura de agua de alimentación:* termocupla tipo J. Se requiere para determinar la entalpía del agua de alimentación, lo cual se hace a través de las tablas de propiedades termodinámicas del agua.
- *Para la presión de la caldera:* Transductor de presión. Se utiliza para determinar la entalpía del vapor, lo cual se hace a través de las tablas de propiedades termodinámicas del agua.
- *Para el flujo de combustible:* contador volumétrico de gas que se encuentra en la línea de suministro; la metodología utilizada para cálculo del flujo másico a la entrada del quemador depende de la estrategia de control.

5.2 COMPORTAMIENTO DE LA CALDERA BAJO CONTROL CONTINUO

Para conocer el comportamiento de la caldera bajo esta estrategia de control primero se muestra como se calcula el flujo másico de combustible para esta estrategia de control, luego se describe el procedimiento utilizado para la realización de las pruebas y finalmente se muestran los resultados obtenidos y los análisis respectivos.

5.2.1 Calculo del flujo de combustible. En primer lugar se mide 1 m^3 de gas a través del contador y el tiempo que tarda en consumirse este volumen en la línea de suministro, en donde el gas se encuentra a una presión de 40 PSig. Teniendo en cuenta que la densidad y el poder calorífico se dan a condiciones normales (25°C , 1atm), entonces, se debe calcular el volumen a estas condiciones, para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{P_1 * V_1}{P_2} = V_2 \quad (5.3)$$

P_1 = Presión de suministro, aproximadamente 54.7 Psia

V_1 = Volumen consumido en la línea de suministro (m^3)

P_2 = Presión atmosférica

V_2 = Volumen consumido a condiciones normales (m^3)

Finalmente el flujo de combustible en Kg/h en cada punto de operación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_f = \frac{V_2 * \rho}{t} \quad (5.4)$$

ρ = Densidad del combustible a condiciones normales, para el gas natural es de $0.72 \text{ Kg}/m^3$

t = Tiempo en horas que se tarda en consumir un metro cúbico de combustible a la presión de suministro.

5.2.2 Procedimiento de la prueba. El procedimiento seguido en las pruebas para realizar la evaluación energética en la caldera, es el siguiente:

- a) **Arranque:** La caldera es encendida y llevada hasta una presión y flujo de vapor inicial que depende de las condiciones requeridas para el primer punto de operación.
- b) **Estabilización:** Cada vez que se arranque o perturbe el sistema se debe esperar que el sistema se estabilice (que se mantengan la presión y el flujo de vapor aproximadamente constante).

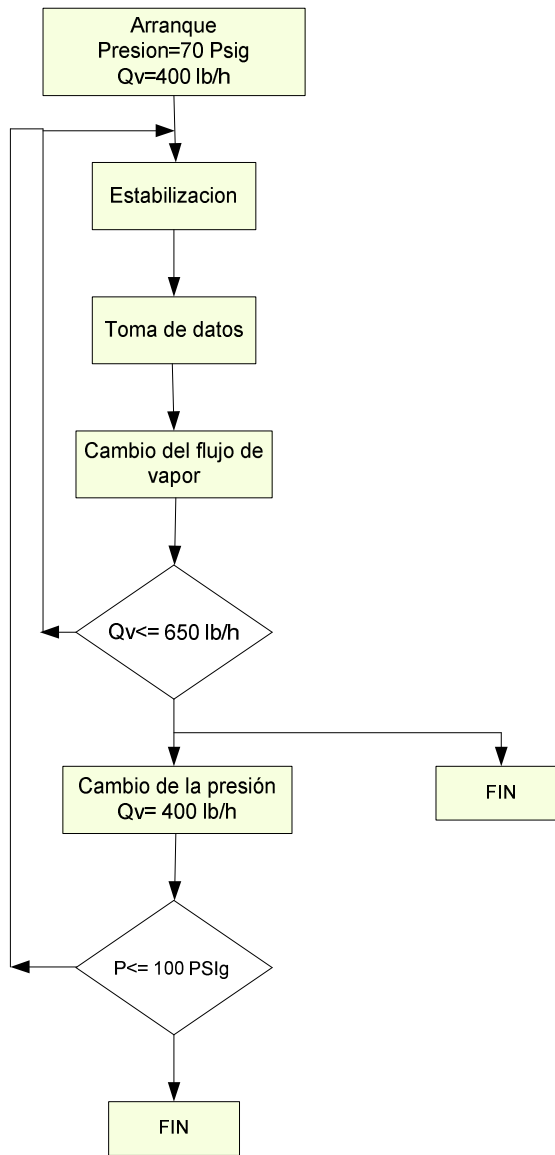
- c) **Toma de datos:** Una vez estabilizado el sistema en el respectivo punto de operación se hace la medición de las variables requeridas para el cálculo de la eficiencia (consumo de gas, flujo de vapor, temperatura del agua de alimentación y presión de caldera).

- d) **Cambio del flujo de vapor:** Se varía el flujo de vapor manteniendo la misma presión; se trabajó en un rango de 400 a 650 lb/h de vapor a intervalos de 50 lb/h.

- e) **Cambio de la presión de la caldera:** Luego de alcanzar las 650 lb/h de vapor se varía la presión de la caldera; se trabajó en un rango de 70 a 100 Psig en intervalos de 10 Psig. Cada vez que se cambia la presión se inicia nuevamente con un flujo de vapor de 400 lb/h y se repite el procedimiento desde el paso b.

Un esquema del procedimiento seguido para obtener los diferentes puntos de operación de las pruebas realizadas en la caldera se aprecia en la siguiente figura:

Figura 106. Esquema seguido para realizar las pruebas en la caldera.



5.2.3 Resultados obtenidos. El comportamiento de la eficiencia y el consumo de combustible obtenido de las pruebas realizadas, se muestran en las siguientes figuras:

Figura 107. Consumo de combustible en operación bajo control continuo.

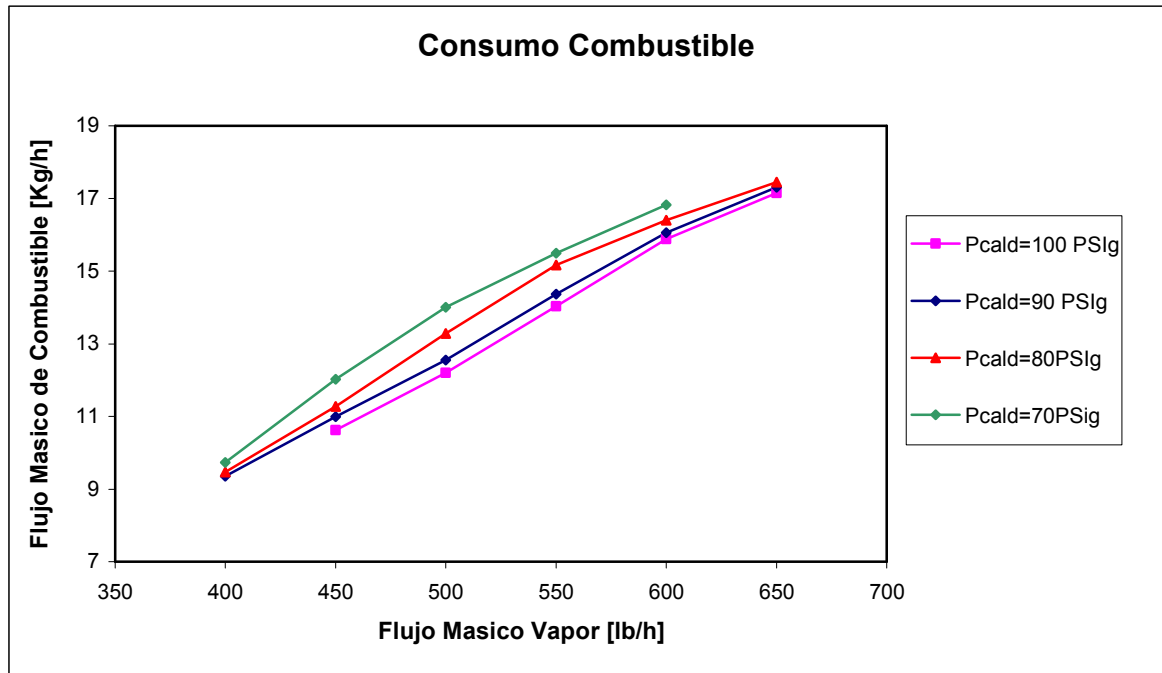
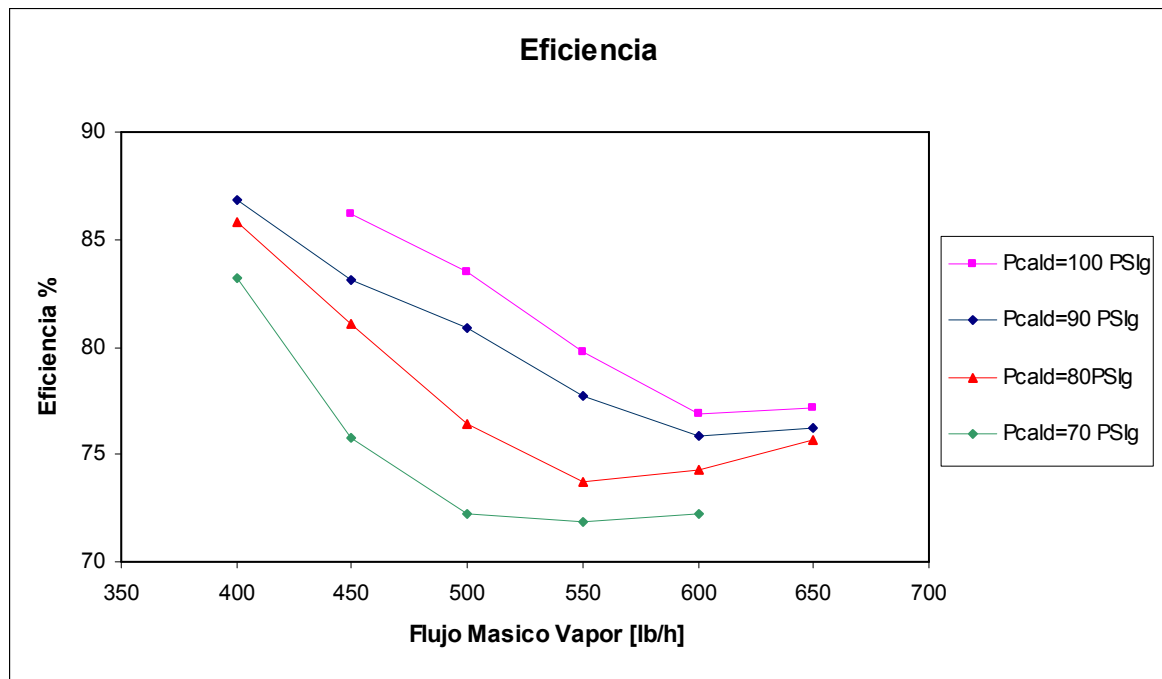


Figura 108. Eficiencia en operación bajo control continuo



Los aspectos a resaltar de los resultados obtenidos son los siguientes:

- El consumo de combustible aumenta y la eficiencia disminuye al aumentar el flujo de vapor para una presión determinada.

En la siguiente tabla se muestra dos puntos de operación para una presión de 100Psig. En esta se observa que para un aumento del flujo de vapor en 10%, el flujo de combustible aumento en un 15%, con una disminución de la eficiencia de 5%.

Tabla 14. Efecto de la variación del flujo de vapor

P_{cald} [Psig]	100	
\dot{m}_v [lb/h]	\dot{m}_f [Kg/h]	η %
500	12.19	83.46
550	14.13	79.76

- El consumo de combustible disminuye y la eficiencia aumenta al aumentar la presión de trabajo para un flujo de vapor determinado.

En la siguiente tabla se muestra dos puntos de operación para un flujo de vapor de 500 lb/h obtenido. En esta se observa que al disminuir la presión en 43%, el flujo de combustible aumento en un 40%, con una disminución de la eficiencia de 15%.

Tabla 15. Efecto del cambio en la presión de operación

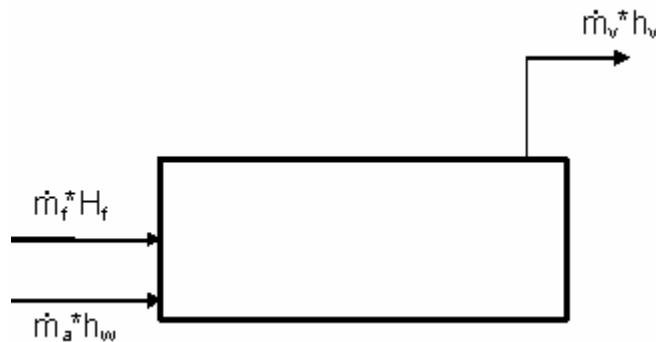
\dot{m}_v [lb/h]	500	
P_{cald} [psig]	\dot{m}_f [Kg/h]	η %
100	12.19	83.46
70	17.01	72.26

5.2.4 Análisis de resultados. La variación de la eficiencia y el consumo de combustible bajo el esquema de control continuo como función del flujo de vapor para diferentes presiones presentan tendencias que pueden justificarse de acuerdo a los análisis que se dan a continuación.

➤ **Efecto de la variación del flujo de vapor para una presión constante.**

- **Sobre el Flujo de combustible.** El aumento del flujo de combustible con el aumento del flujo de vapor, se muestra en la figura 107. Es un comportamiento lógico que se deriva con un balance de energía en la caldera para condiciones estables, es decir que la energía que entra (Calor suministrado por el combustible y agua de alimentación) es igual a la que sale (calor del vapor) Figura #:

Figura 109. Balance de energía de la caldera para condiciones estables



$$\dot{m}_f * H_f * \eta + \dot{m}_a * h_{wa} = \dot{m}_v * h_v \quad (5.5), \text{ valido para condiciones de operación estables.}$$

En estas condiciones el flujo de vapor (\dot{m}_v) es igual al flujo de agua de alimentación (\dot{m}_a) por lo tanto la ecuación 5.5 se puede escribir de la siguiente manera:

$$\dot{m}_f * H_f * \eta = \dot{m}_v * (h_v - h_{wa}) \quad (5.6)$$

Despejando \dot{m}_f se obtiene:

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_v * (h_v - h_{wa})}{H_f * \eta} \quad (5.7)$$

Teniendo en cuenta que la entalpía del vapor, la entalpía del agua de alimentación y el poder calorífico del gas en este caso son constantes, entonces se observa en la que el flujo de combustible es proporcional al flujo de vapor, si la eficiencia fuera igual a uno ($\eta = 1$), entonces para un aumento en el flujo de vapor el flujo de combustible aumentara. En la realidad la eficiencia es menor que uno ($\eta < 1$), por la tanto el flujo de combustible será aun mayor.

- **Sobre la Eficiencia.** El efecto que causa el aumento del flujo de vapor en la eficiencia se puede ver en la figura 108.

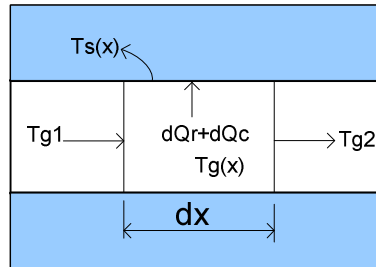
La razón que determina este comportamiento se puede deducir de la definición de eficiencia la cual se representa a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Q_T}{Q_S}$$

Analizando esta ecuación se puede apreciar que el aumento o disminución de la eficiencia depende de, en que proporción aumenta el calor transferido al agua (Q_T) con respecto al calor suministrado por el combustible (Q_S).

En cada tramo de la tubería los gases de combustión van cediendo calor al agua, a consecuencia de esto la temperatura de los gases de combustión va disminuyendo. Esto se puede analizar a través de un balance de energía en un diferencial de un tubo de la caldera como se puede apreciar en el siguiente gráfico.

Figura 110. Balance de energía de un diferencial de un tubo de la caldera.



En donde:

$$Q_T = \sum dQ_x$$

$$dQ_x = dQ_c + dQ_r$$

La temperatura de los gases a la salida de cada diferencial (T_{g2}) se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$T_{g2} = \frac{dQ_T}{\dot{m}_g * C_{pg(T_1)}} + T_{g1}$$

$C_{pg(T_1)}$ = Calor específico de los gases de combustión

El calor transferido por radiación se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$dQ_r = \frac{dA * \sigma * (\epsilon_g * T_g^4 - T_s^4)}{\epsilon_s + a_g - \epsilon_s * a_g}$$

De la ecuación anterior se deduce que el calor por radiación depende básicamente de la temperatura de los gases de combustión y de la temperatura de superficie de los tubos, ya que estas a su vez definen la emisividad, absorptividad de los gases y la emisividad de los tubos.

El calor transferido por convección se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$dQ_c = dA * h_i * (T_{gx} - T_s)$$

Donde el coeficiente de transferencia de calor por convección es función de Reynolds, Prandtl y de la conductividad del fluido.

$$h_i = f(\text{Re}_D, \text{Pr}, K)$$

$$\text{Re}_D = \frac{4 * \dot{m}_g}{\pi * D * \mu}$$

A través de estas ecuaciones se puede deducir que los factores que definen el calor por convección es la masa de gases (\dot{m}_g) y la diferencia de temperatura ($T_{gx} - T_s$), ya que la masa y la temperatura de los gases también determinan el coeficiente de transferencia de calor (h_i)

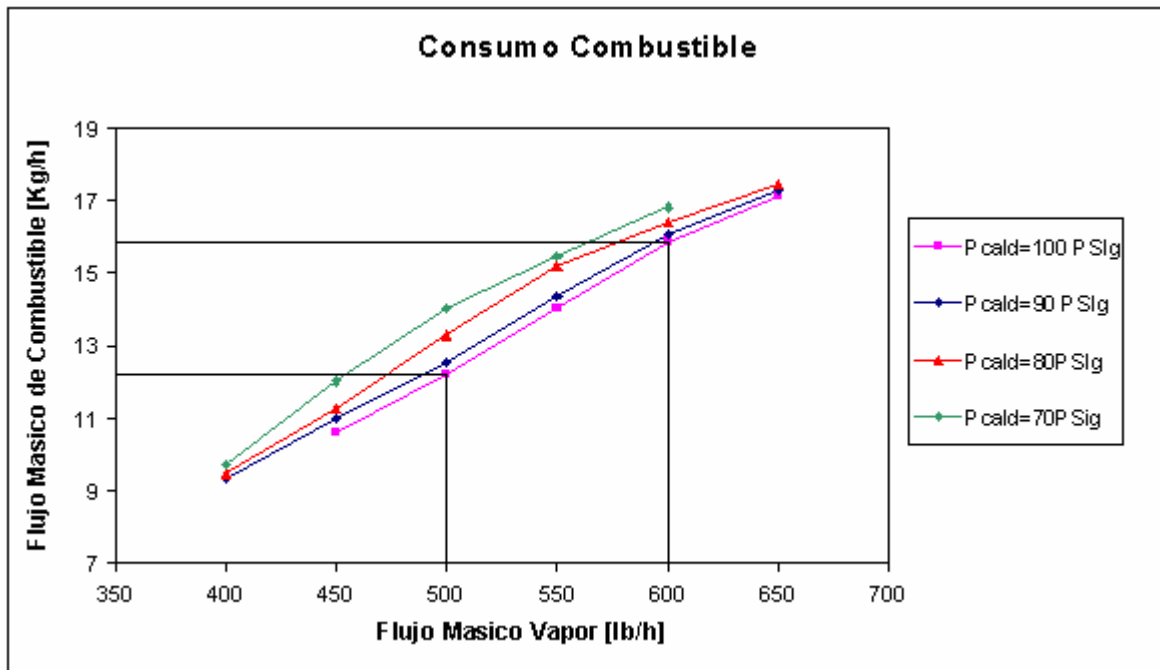
Se concluye que en una caldera piro-tubular las variables que definen la transferencia de calor son la temperatura de gases (T_{gx}), la temperatura de superficie de los tubos (T_s) y el coeficiente de transferencia de calor (h_i), que son función de la masa de gases de combustión \dot{m}_g .

La determinación de la variación relativa del calor transferido al agua en función del calor suministrado por el combustible, para definir la eficiencia, se obtiene a través de la simulación para dos puntos de operación obtenidos de las pruebas realizadas directamente sobre la caldera:

- Flujo de vapor de 500 lb/h que corresponde a un flujo de combustible de 12.19Kg/h.
- Flujo de vapor de 600 lb/h que corresponde a un flujo de combustible de 15.88Kg/h

Estos puntos se observan en la siguiente figura

Figura 111. Puntos de operación usados para análisis teórico



Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 16. Tabla resultados obtenidos a través de la simulación, del efecto que causa el cambio en el flujo de vapor.

P_{cald} [psig]	100						
\dot{m}_v [lb/h]	\dot{m}_f [Kg/h]	\dot{m}_g [Kg/h]	Q_s [Kw]	Q_r [Kw]	Q_c [Kw]	Q_T [Kw]	η %
500	12.19	231.84	169.77	47.21	90.62	137.83	81.2
600	15.88	302	221.16	53.58	121.92	175.5	79.35
Datos experimentales		Resultados teóricos					

En esta tabla se observa que un aumento en el flujo de vapor de un 20% genero un aumento del 30.3% en el flujo de combustible y en el respectivo calor suministrado, mientras el calor transferido al agua solo aumento un 27.3%. El calor suministrado aumenta en mayor proporción que el calor transferido al agua, por esta razón la eficiencia disminuyo en 2.3%

➤ **Efecto de la variación de la presión para un flujo de vapor determinado.**
El efecto del cambio en la presión de operación sobre la eficiencia y el consumo de combustible se puede observar en las figuras 107, 108.

El calor que se transfiera al agua debe mantenerse aproximadamente igual al calor de vaporización, como se puede deducir analizando la siguiente ecuación:

$$Q_T = \dot{m}_v * (h_v - h_{wa}) \quad (5.8)$$

Teniendo en cuenta que para este caso el flujo de vapor es constante, entonces, para mantener la estabilidad en el sistema, el calor transferido debe ser aproximadamente constante.

En la caldera se tiene agua en saturación, por lo tanto un aumento de la presión esta relacionado con un aumento de temperatura del vapor.

Este aumento en la temperatura del vapor genera cambios en la transferencia de calor en el exterior de los tubos, esto se aprecia en la siguiente ecuación:

$$Q_T = A * h_e * (T_s - T_{sat})$$

En donde:

A = área de transferencia de calor

$$h_e = \frac{Nu * k}{L_c}$$

$$Nu = \frac{J_{al}^2}{0.013^3 * Pr_l^2}$$

En donde:

$$J_{al} = \frac{C_{pl} * (T_s - T_{sat})}{h_{fg}}$$

$$L_c = \left[\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v) * g} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Las ecuaciones anteriores implican que el calor transferido al agua es proporcional a $(T_s - T_{sat})^3$.

La determinación de la variación relativa del calor transferido al agua en función de la presión, se obtuvo a través de la simulación para dos puntos de operación de la caldera, para un flujo de vapor de 500 lb/h:

- Presión de 100 Psig que corresponde a una temperatura de vapor de 170 °C.
- Presión de 70 Psig que corresponde a una temperatura de 158 °C.

Los resultados obtenidos se observan en la siguiente tabla:

Tabla 17. Tabla resultados obtenidos a través de la simulación, del efecto que causa el cambio de la presión de operación.

\dot{m}_v [lb/h]	500								
P_{cald} [psig]	Q_v [Kw]	\dot{m}_f [Kg/h]	\dot{m}_g [Kg/h]	$(\bar{T}_s - T_{sat})$ °C	\bar{h}_e [Kw/m ² K]	Q_r [Kw]	Q_c [Kw]	Q_T [Kw]	η %
100	167.74	15.4	293.04	173.2-170=3.2	9.45	52.69	115.03	167.74	78.2
70	166.94	14.93	284	166.6-158=4.6	8.51	52.25	114.71	166.96	80.3

En esta tabla se observa que los resultados teóricos indican que al disminuir la presión en un 43%, el flujo de combustible disminuye en 3% y la eficiencia aumento 2.7%, lo cual indica que la transferencia de calor mejoro, debido al aumento del delta de temperatura entre la superficie de los tubos y el agua.

Como se aprecia los resultados teóricos obtenidos difieren de los resultados reales, lo cual indica que las ecuaciones utilizadas no describen exactamente el proceso de transferencia de calor real; sin embargo son las que se encuentran en los textos de transferencia de calor. Para obtener resultados más cercanos a los reales se debe estudiar con más detalle el proceso real.

5.3 COMPORTAMIENTO DE LA CALDERA BAJO CONTROL ON-OFF

En este caso para aplicar el método directo para el cálculo de la eficiencia se tiene en cuenta la media de presión y consumo de combustible.

5.3.1 Presión media. Se estima de acuerdo a la presión de encendido y de apagado del sistema aplicando la siguiente ecuación:

$$\bar{P}_{cald} = \frac{(P_{max} + P_{min})}{2} \quad (5.9)$$

\bar{P}_{cald} = Presión media de la caldera

P_{max} = Presión de apagado

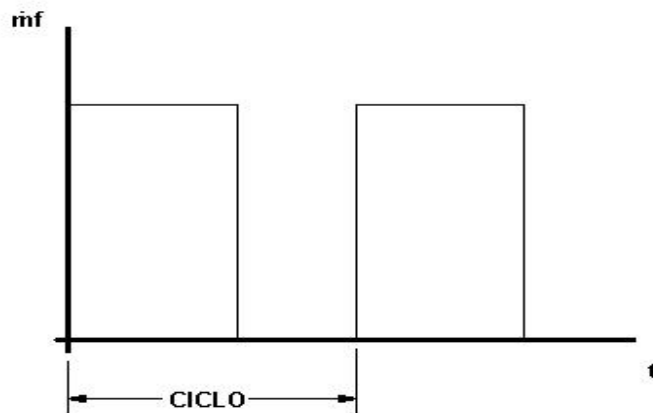
P_{min} = Presión de encendido (Presión de la caldera en el momento en el que se presenta nuevamente la combustión).

En base a esta presión se estima la entalpía del vapor.

5.3.2 Consumo medio de combustible. Para determinarlo, se mide el volumen de combustible consumido en la línea de suministro desde el momento en se presenta combustión en la caldera, hasta alcanzar la presión máxima (momento en que se apaga), es decir mientras el sistema se mantiene activo; esto se hace en cada ciclo, cada punto de operación se mantiene por dos ciclos. Un ciclo de operación se puede ver en la figura 112.

Luego al igual que lo hecho en control continuo se obtiene el volumen de combustible a condiciones normales a través de la ecuación 5.3.

Figura 112. Ciclo de operación bajo control on-off



Finalmente el flujo medio de combustible se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{m}_f = \frac{V_{T2} * \rho}{t_T} \quad (5.10)$$

\bar{m}_f = flujo másico medio de combustible (Kg/h)

V_{T2} = Volumen total de combustible consumido a condiciones normales en dos ciclos (m^3)

t_T = tiempo total en horas transcurrido en dos ciclos.

5.3.3 Procedimiento de la prueba. La metodología para realizar las pruebas de comportamiento de la caldera bajo esta estrategia de control, es similar a lo hecho bajo control continuo.

La principal diferencia radica en que en este caso la presión no es constante, varía entre una máxima y una mínima, por lo cual la variación de la presión se realiza

cambiando la presión máxima de tal forma que la presión media este en el mismo rango utilizado en control continuo; el delta de presión se mantiene fijo en 15 Psig.

Hay que tener en cuenta que el delta de presión determina la presión a la cual el sistema arranca nuevamente, el arranque de la caldera siempre inicia con un barrido de gases de 30 segundos antes de iniciar la combustión, durante estos 30 segundos previos a la combustión, la presión cae aproximadamente 5 Psig mas.

5.3.4 Resultados obtenidos. El comportamiento del consumo de combustible y la eficiencia obtenido de las pruebas realizadas en la caldera bajo esta estrategia se muestra en las siguientes figuras.

Figura 113. Consumo de combustible en operación bajo control on-off.

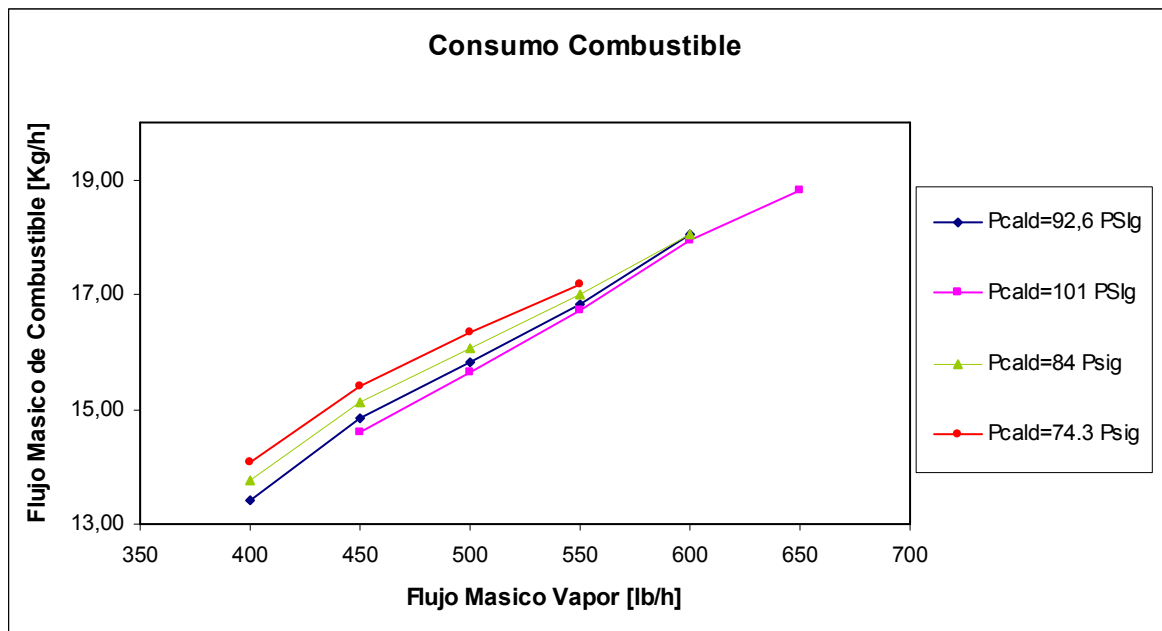
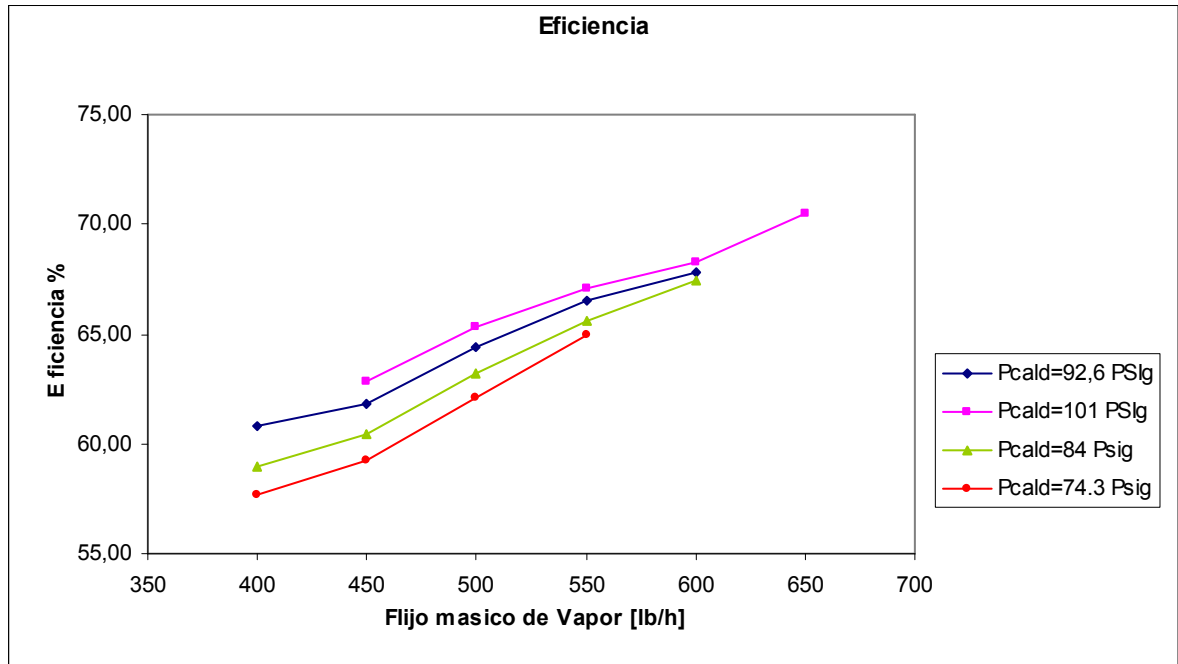


Figura 114. Eficiencia en operación bajo control continuo.



Los aspectos a resaltar de los resultados obtenidos son los siguientes:

- El consumo de combustible y la eficiencia aumentan al aumentar el flujo de vapor para una presión determinada.
- El consumo de combustible disminuye y la eficiencia aumenta al aumentar la presión de trabajo para un flujo de vapor determinado, pero tienden a estabilizarse a un valor fijo a flujos de vapor altos.

5.3.5 Análisis de resultados. Se aprecia que la principal diferencia con los resultados obtenidos del compartimiento del sistema bajo control continuo es el aumento de la eficiencia “media” con el flujo de vapor. Por lo tanto solo se tendrá en cuenta el efecto que causa el cambio de flujo de vapor a una presión media determinada, sobre la eficiencia.

➤ **Efecto del flujo de vapor a una presión determinada.** El aumento de la eficiencia con el flujo de vapor se muestra en la figura 114 y se justifica analizando la siguiente ecuación:

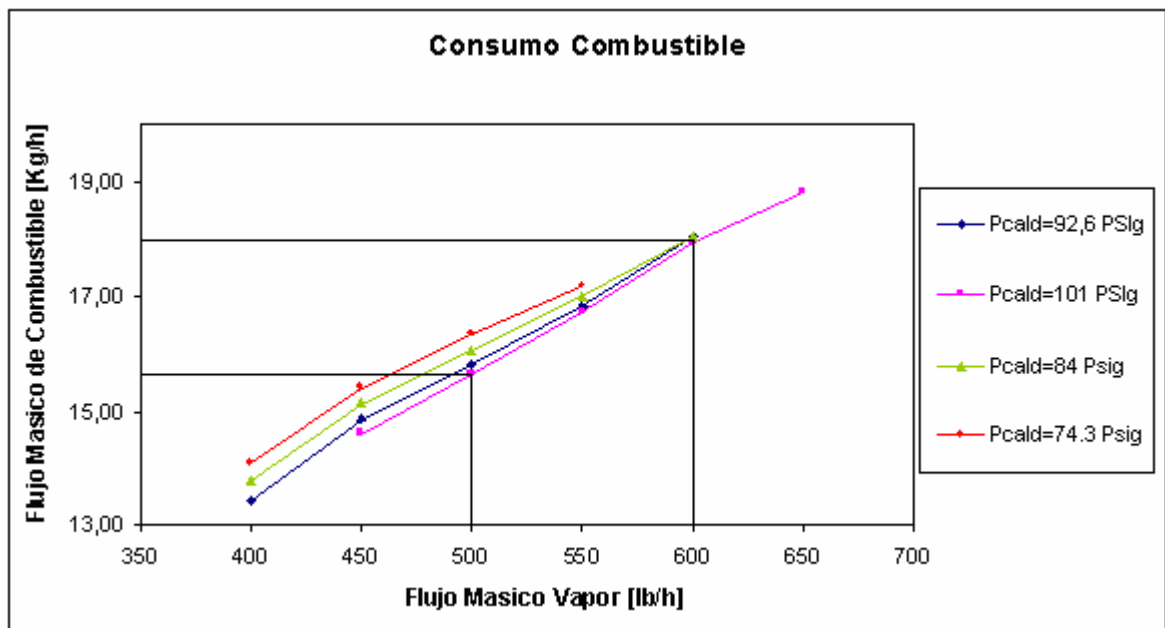
$$\eta = \frac{m_v}{m_f} * cte \quad (5.11)$$

Donde

$$cte = \frac{(\bar{h}_v - h_{aw})}{H_f}$$

Como se aprecia en la ecuación anterior la eficiencia media depende de, en que proporción el flujo de combustible medio aumenta con respecto del flujo de vapor.

Figura 115. Puntos de operación usados para análisis.



La siguiente tabla muestra dos puntos de operación (Figura 115) y la eficiencia correspondiente:

Tabla 18. Efecto del cambio del flujo de vapor para operación bajo control on-off

P_{cald} [psig]	100	
\dot{m}_v [lb/h]	\dot{m}_f [Kg/h]	η %
500	15,63	65,28
600	17,95	68,23

En esta se observa que para un aumento del flujo de vapor en un 10%, el flujo de combustible aumento en 7%, por lo tanto el flujo de combustible aumento en menor proporción que el flujo de vapor, por esta razón la eficiencia aumento en un 2.8%.

Hay que tener en cuenta que a medida que aumenta el flujo de vapor, los periodos de tiempo en que el sistema se mantiene encendido son más prolongados y los tiempos de apagado son más cortos, como se aprecia en las figuras 116, 117, en donde la línea roja representa la media de consumo de combustible; por lo tanto la eficiencia media se acerca a la neta, que es la eficiencia del sistema en el periodo en el que se mantiene encendido.

Figura 116. Histórico de consumo de combustible obtenido de simulación para un flujo de vapor de 450 lb/hr (operación bajo control on-off).

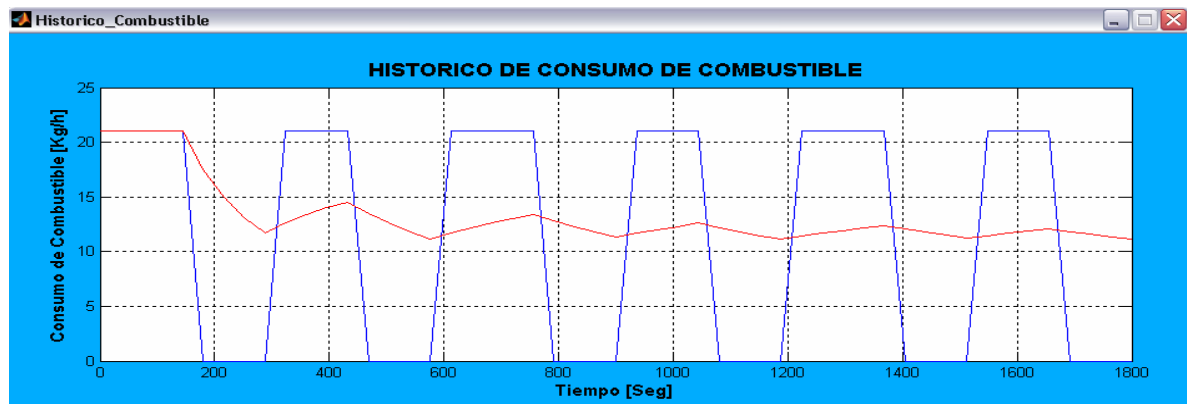
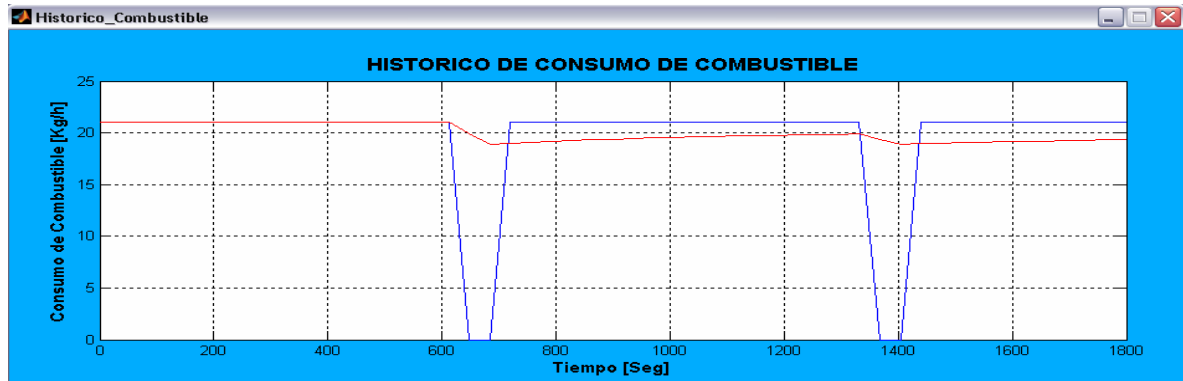


Figura 117. Histórico de consumo de combustible obtenido de simulación para un flujo de vapor de 650 lb/hr (operación bajo control on-off).



5.4 COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA Y EL FLUJO DE COMBUSTIBLE OBTENIDO CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO CONTRA LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF.

Para comparar la eficiencia y el consumo de combustible obtenido con las dos estrategias de control, se tendrá en cuenta dos puntos de operación. Para control continuo una presión de 100 Psig y flujos de vapor de 550 y 650 lb/h y para control on-off una presión “media” de 100 Psig y los mismos flujos de vapor.

Tabla 19. Comparación entre el rendimiento del sistema operando bajo control continuo y on-off

Presion [Psig]	100			
	eficiencia[%]		Consumo de combustible[Kg/h]	
m_v [lb/h]	η_{on-off}	$\eta_{continuo}$	$m_{f(on-off)}$	$m_{f(continuo)}$
550	67,1	79,76	16,73	14,03
650	70,5	77,13	18,82	17,15

Como se aprecia en la tabla 19, en cualquier punto de operación la eficiencia es mayor bajo la estrategia de control continuo que con la estrategia de control on-off, lo cual conlleva a un menor consumo de combustible.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.

- La evaluación de la incidencia de la presión y el flujo de vapor sobre el consumo de combustible y la eficiencia, tanto para operación bajo control on-off como para control continuo de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas de la escuela de ingeniería mecánica, se realizó a través de la simulación del proceso de generación de vapor por medio de software y la realización de pruebas directamente sobre la ella.
- El software simula en forma dinámica la operación de una caldera pirotubular, la cual permite estudiar las principales variables que intervienen en el proceso de generación de vapor (presión, flujo de vapor, consumo de combustible, eficiencia, temperatura de los gases de combustión), la principal característica de la simulación es su sencillez, tal que alguien con pocos conocimientos en computadores o en operación de una caldera puede manejarla.
- El modelo matemático desarrollado para la simulación muestra resultados adecuados para los propósitos del trabajo, al servir para el entendimiento del proceso de generación de vapor y para entrenamiento en la operación de la caldera.
- En las pruebas realizadas en la caldera operada bajo control continuo se obtienen mayores eficiencias a bajos flujos de vapor y esta decrece en la medida que el flujo de vapor aumenta, presentando un punto de inflexión al acercarse a los máximos flujos de vapor.

- En la caldera operada bajo control on.off se obtuvo mayores eficiencias a altos flujos de vapor y esta decrece en la medida que el flujo de vapor disminuye.
- En la caldera al aumentar la presión de operación, la eficiencia tiende a aumentar, esta tendencia es igual tanto para operación bajo control continuo como on-off.
- En términos generales la caldera operada bajo control continuo presenta mayores eficiencias y menores consumos de combustible que bajo control on-off.

6.2 RECOMENDACIONES

- Las características mencionadas anteriormente, hacen de esta simulación, una herramienta muy útil, para conocer la respuesta de la caldera ante perturbaciones realizadas, evitando realizar pruebas directamente sobre ella. Por lo cual se recomienda seguir analizando y depurando esta simulación para que versiones futuras sean más completas.
- La simulación reporta resultados adecuados para los propósitos del trabajo, pero se presentan diferencias con los obtenidos en las pruebas reales. Para obtener resultados más cercanos a los reales se recomienda hacer un estudio más riguroso del proceso de conversión energética en la caldera pirotubular.

BIBLIOGRAFÍA

SHIELD, Carl. Calderas. Tipos, Características y sus funciones. México, McGraw-Hill, 1973. 716 p.

RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Operación de calderas Industriales. Santa fe de Bogota, Ecoe ediciones, 2000. 235p.

BABCOCK, George y WILCOX, Stephen. Steam-Its generation and use. Edición 40, Barbeton (Ohio) 1992. 1158 p.

MARADEY CHARRIS, Juan Francisco. Termodinámica aplicada, Bucaramanga, ediciones UIS, 2002. 690 p.

CASTRO, Javier. Operación y Mantenimiento de Calderas. Unidad de Publicaciones Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia. Santa fe de Bogota, 2002. 242 p.

HOLMAN, J.P. Fundamentos de transferencia de calor. Octava edición. Madrid, Limusa, 1998. 484 p.

MILLS, Anthony F. Transferencia de calor. Madrid, Irwin, 1995. 932 p.

User Manual, FP-1000/1001, National Instrument Corporate Headquarters.

CREUS, Antonio. Instrumentación industrial. Sexta edición. Barcelona, Alfaomega, 1997. 750 p.

BALCELLS Joseph y ROMERAL, José Luís. Autómatas programables. México, 1998. 439 p.

AMAYA, Víctor y ROMERO, Gustavo. Tesis "Adecuación de un sistema de control para el manejo de la caldera y el turbogenerador de una planta térmica". 2001

ANEXOS

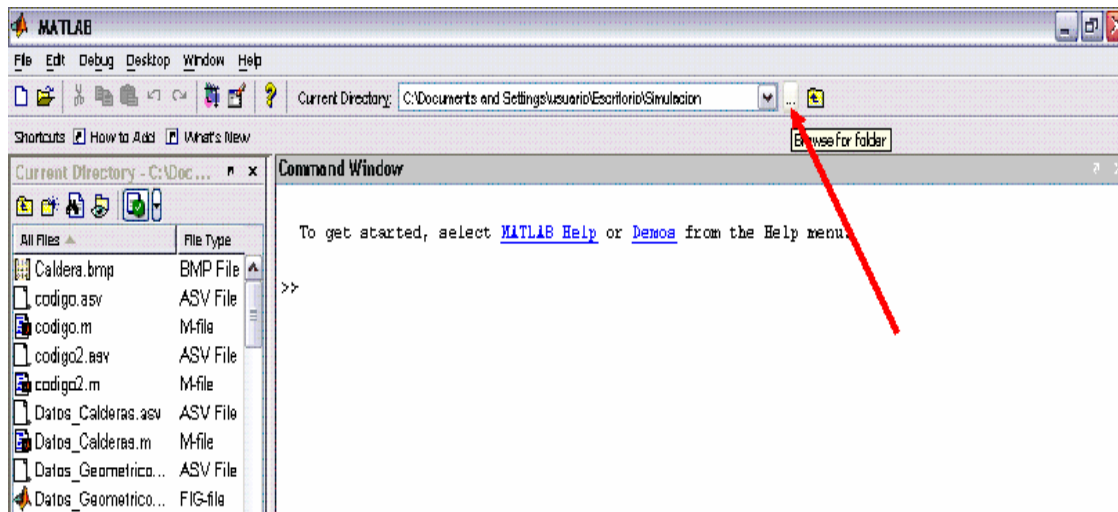
Anexo 1. MANUAL DEL USUARIO

La simulación esta realizada en Matlab 7.0, por lo cual se requiere que este instalado este programa junto con la aplicación simulink.

Para iniciar la simulación se deben realizar los siguientes pasos:

1. Iniciar Matlab.
2. Indicar la dirección en donde se encuentra guardada la simulación.

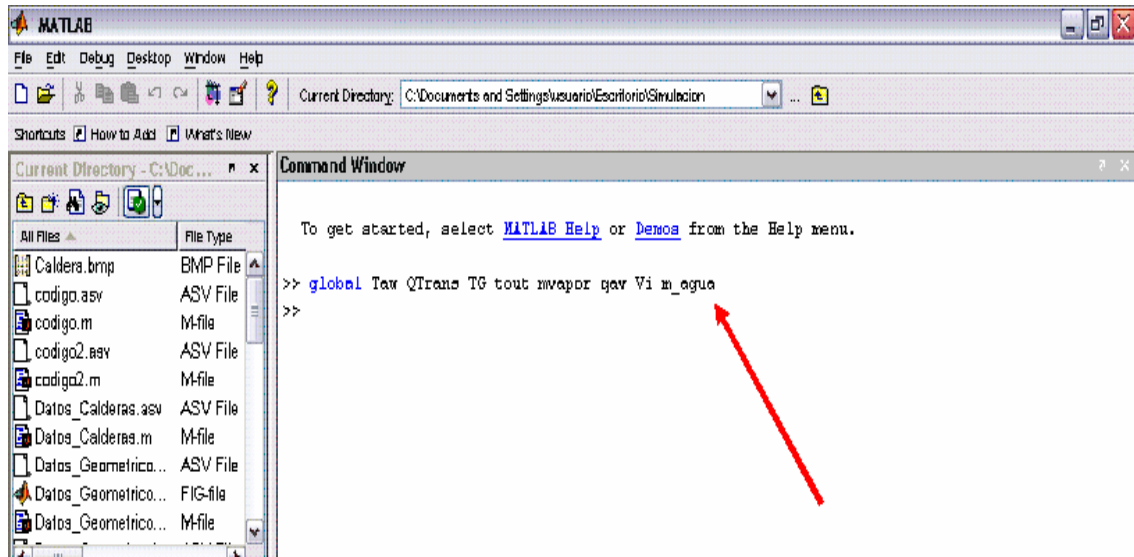
Lugar en donde se debe indicar la dirección en donde se guarda la simulación.



3. Activar las variables requeridas en simulink. Para esto se debe ejecutar en el command window lo siguiente:

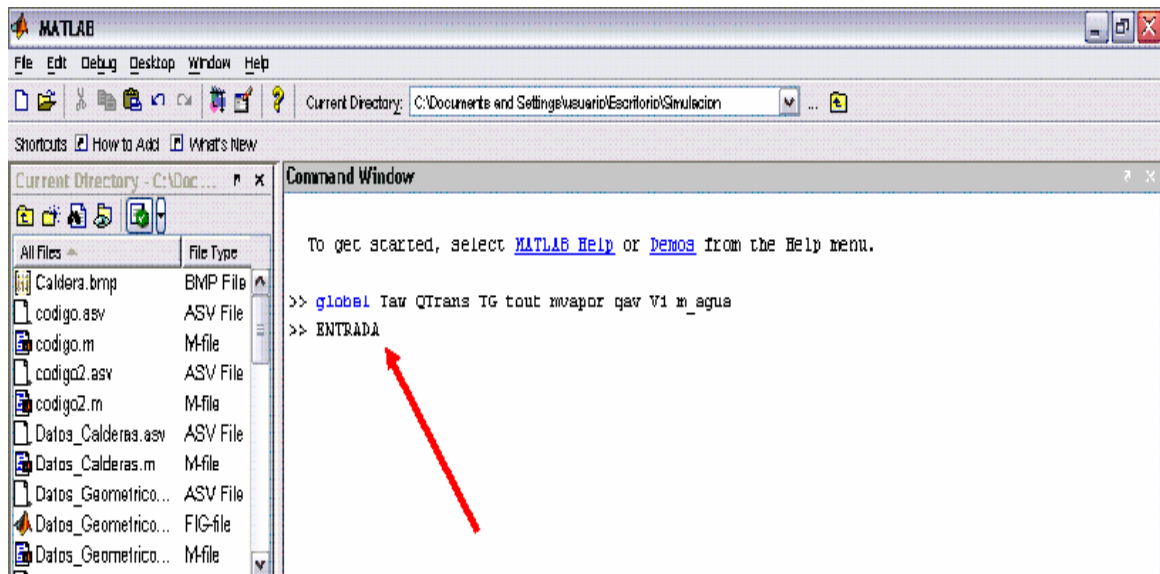
global Taw QTrans TG tout mvapor qav Vi m_agua

Activación de las variables requeridas por simulink



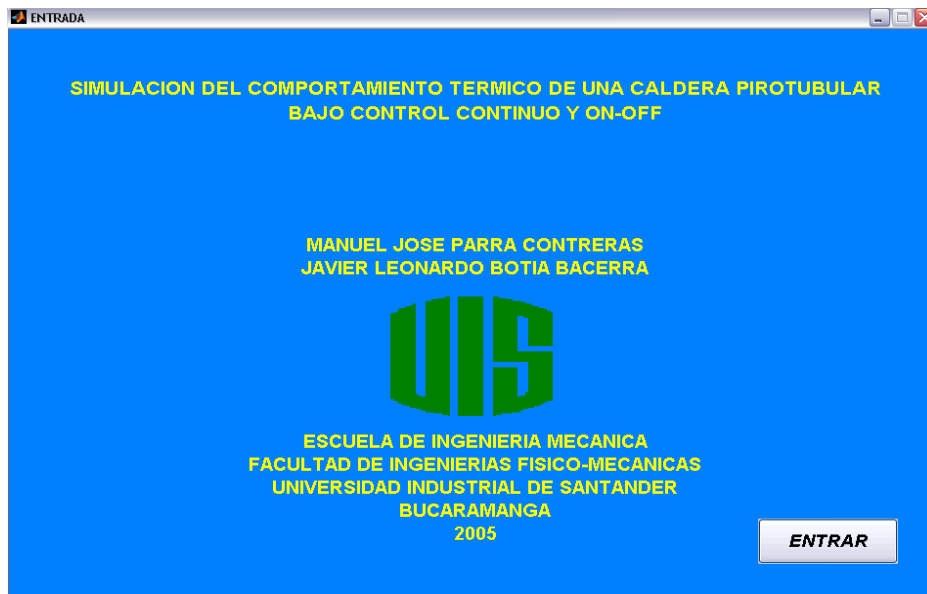
4. Ejecutar en el command window ENTRADA (este es el programa de inicio).

Ejecución del programa de inicio



Una vez hecho esto se abrirá la ventana de presentación.

Ventana de presentación.



5. Picar en el botón “ENTRAR”, al hacer esto se abrirá la ventana de ingreso de los datos geométricos de la caldera.

Ventana en donde se ingresan los datos geométricos



6. Una vez se hallan ingresado los datos geométricos se debe picar en el botón “ACEPTAR”, al hacer esto se abrirá la ventana para el ingreso de los datos operacionales.

Ventana en donde se ingresan los datos operacionales



- Una vez se hallan ingresado los datos operacionales se debe picar en el botón “ACEPTAR”, con lo cual se abrirá la ventana principal de simulación.

Ventana principal de simulación.



8. Cuando se hallan ingresado los datos restantes se pica en el botón “INICIAR SIMULACION”, al hacer esto se da inicio a la simulación.

ASPECTOS A TENER EN CUENTA

- En el transcurso de la simulación se puede cambiar la presión requerida, en el caso que se este operando bajo control continuo, o, la presión máxima y el delta de presión, en el caso que se este operando bajo control on-off, el flujo de vapor requerido y el tiempo de simulación.

Para hacer esto se ingresa el dato que se desea cambiar y luego se pica en el botón “INICIAR SIMULACION”.

- La simulación esta predeterminada para iniciar desde el arranque, es decir, desde que el agua se encuentra a condiciones atmosféricas.
- Si se presenta algún error en el transcurso de la simulación se debe iniciar desde el paso 3.

Anexo 2. ATRIBUTOS Y RANGOS DE LOS MODULOS FIELDPOINT

ATRIBUTO

Para un modulo FieldPoint un atributo significa las diferentes posibilidades en que la señal que el modulo mide puede capturarse.

Por ejemplo el modulo de termocupla mide señales de temperatura, las diferentes posibilidades (o atributos) de termocuplas que se pueden conectar al modulo están relacionadas con el tipo de juntura que la termocupla tiene. En este caso atributo se asemeja a tipo de termocupla.

Existen 8 tipos de termocuplas diferentes J, K, T, E, R, S, N, y B

RANGO

Para un modulo FieldPoint un rango significa entre valores puede medirse la señal que recibe o envía el modulo.

Por ejemplo el modulo de salidas analogas , solo tiene dos posibilidades de medida entr 0-20 mA o entre 4-20 mA

Atributos y rangos de los diferentes módulos utilizados para la caldera del laboratorio.

Modulo AI-110

Tipo= entradas análogas

Clase atributo:

[0]=filter settings

entrada de atributo:

0= filtro de 60 Hz

1= filtro de 50 Hz

2= filtro de 500 Hz

clase de rango

Rango[0]	LimiteInf:=0;LimiteSup:=21;UndRango:='mA';
Rango[1]	LimiteInf:=3.5;LimiteSup:=21;UndRango:='mA'
Rango[2]	LimiteInf:=-21;LimiteSup:=21;UndRango:='mA'
Rango[3]	LimiteInf:=-10.4;LimiteSup:=10.4;UndRango:='V'
Rango[4]	LimiteInf:=0;LimiteSup:=10.4;UndRango:='V'
Rango[5]	LimiteInf:=-5.2;LimiteSup:=5.2;UndRango:='V'
Rango[6]	LimiteInf:=0;LimiteSup:=5.2;UndRango:='V'
Rango[7]	LimiteInf:=-1.04;LimiteSup:=1.04;UndRango:='V'
Rango[8]	LimiteInf:=0;LimiteSup:=1.04;UndRango:='V'
Rango[9]	LimiteInf:=-325;LimiteSup:=325;UndRango:='mV'
Rango[10]	LimiteInf:=-65;LimiteSup:=65;UndRango:='mV'

Modulo TC 120

Tipo = entrada analogica

Clase Atributo

[0] = tipo de termocupla

EntAtributo[0] 'J Type'

EntAtributo[1] 'K Type'

EntAtributo[2] 'T Type'

EntAtributo[3] 'E Type'

EntAtributo[4] 'R Type'

EntAtributo[5] 'S Type'

EntAtributo[6] 'N Type'

EntAtributo[7] 'B Type'

ClaseRango

Rango[0] LimiteInf:=-50;LimiteSup:=50;UndRango:='mV'

Rango[1] LimiteInf:=-25;LimiteSup:=25;UndRango:='mV'

Rango[2] LimiteInf:=-20;LimiteSup:=80;UndRango:='mV'

Rango[3] LimiteInf:=-100;LimiteSup:=100;UndRango:='mV'

Rango[4] LimiteInf:=0;LimiteSup:=2048;UndRango:='K'

Rango[5] LimiteInf:=-270;LimiteSup:=1770;UndRango:='°C'

Rango[6] LimiteInf:=-454;LimiteSup:=3218;UndRango:='°F'

Modulo CTR-500

Tipo 1:Count Input';

ClaseAtributo

[0]=Terminal Count'

EntAtributo[0] 'Integer from 0 to 65535'

ClaseAtributo

[1] ='Count Source'

EntAtributo[0] 'External Count Input'

EntAtributo[1] 'Previous Channel'

EntAtributo[2] '1 kHz Reference'

EntAtributo[3] '32 kHz Reference'

ClaseAtributo

[2]= 'Gate Source'

EntAtributo[0] 'Gate Input 0'

EntAtributo[1] 'Gate Input 1'

EntAtributo[2] 'Gate Input 2'

EntAtributo[3] 'Gate Input 3'

EntAtributo[4] 'Always Disabled'

EntAtributo[5] 'Always Enabled'

ClaseAtributo

[3] ='Read/Reset Mode'

EntAtributo[0] 'Do Not Reset on Read'

EntAtributo[1] 'Reset on Read'

ClaseAtributo
[4] ='Noise Rejection'
EntAtributo[0] '200 Hz';
EntAtributo[1] '50 kHz'
ClaseRango
Rango[0] LimiteInf:=0;LimiteSup:=65535;UndRango:='Counts';
ClaseComando
ClaseComando[0]= 'Control Commands'
EntComando[0] 'Reset Counter'
EntComando[1] 'Increment Counter'

Tipo 2:Discrete Output';

ClaseAtributo
[0] = Output Source
EntAtributo[0] 'Counter Channel 0'
EntAtributo[1] 'Counter Channel 1';
EntAtributo[2] 'Counter Channel 2'
EntAtributo[3] 'Counter Channel 3'
EntAtributo[4] 'Counter Channel 4'
EntAtributo[5] 'Counter Channel 5'
EntAtributo[6] 'Counter Channel 6'
EntAtributo[7] 'Counter Channel 7'
EntAtributo[8] 'Discrete Data'
ClaseAtributo
[1] ='Output Mode'
EntAtributo[0] 'Toggle, Reset Off'
EntAtributo[1] 'Toggle, Reset On'
EntAtributo[2] 'On Pulse'
EntAtributo[3] 'Off Pulse'
ClaseRango
Rango[0] LimiteInf:=0;LimiteSup:=1;UndRango:='Boolean';VlrRango:=\$10;

Modulo AO-200

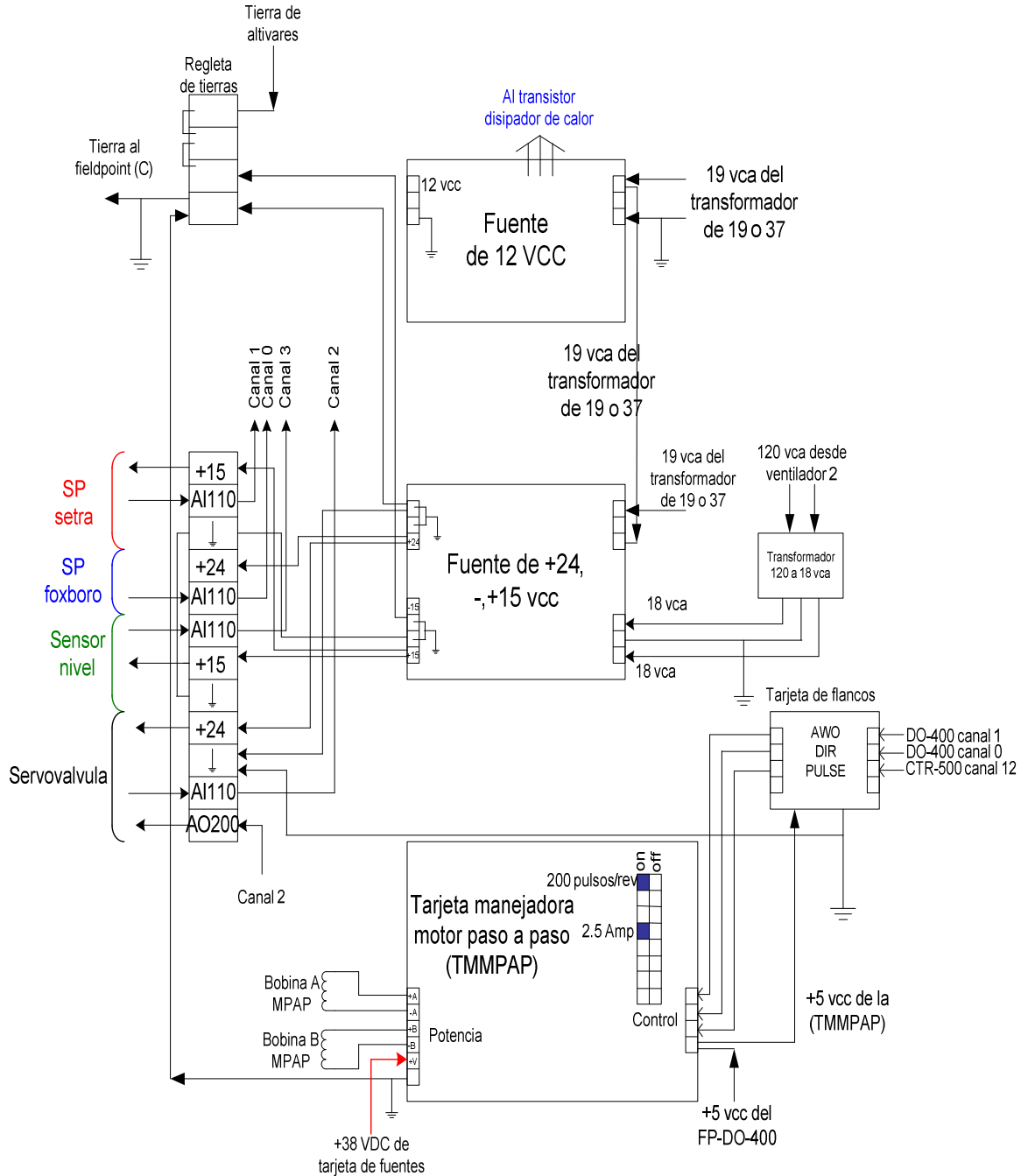
Tipo 1:Analog Output';
Clase de Rango
Rango [0] LimiteInf:=0;LimiteSup:=21;UndRango:='mA'
Rango[1] LimiteInf:=3.5;LimiteSup:=21;UndRango:='mA'

Modulo DO-400

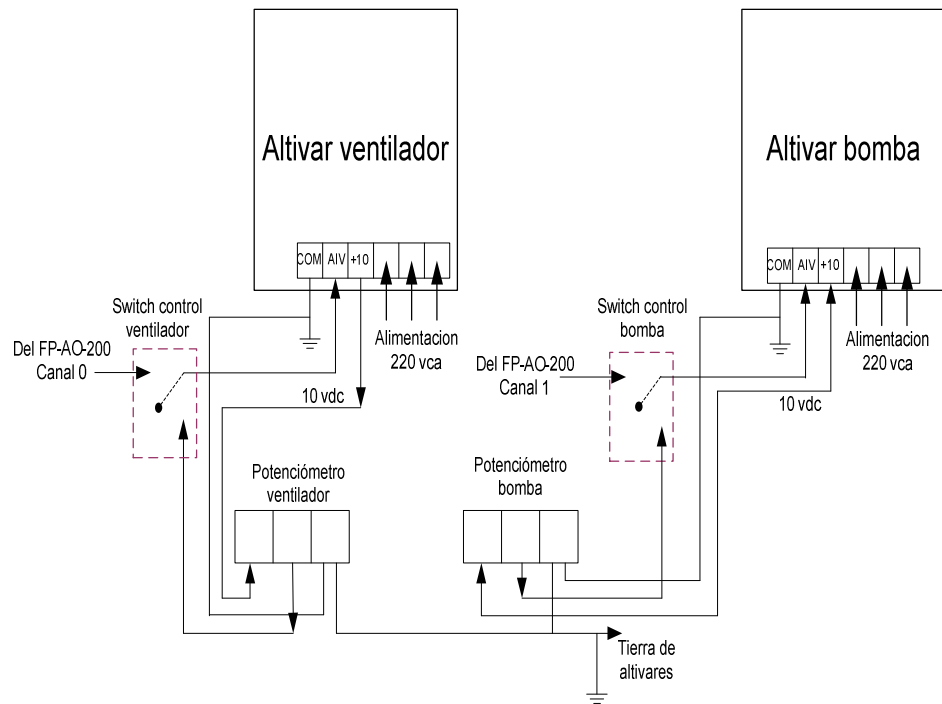
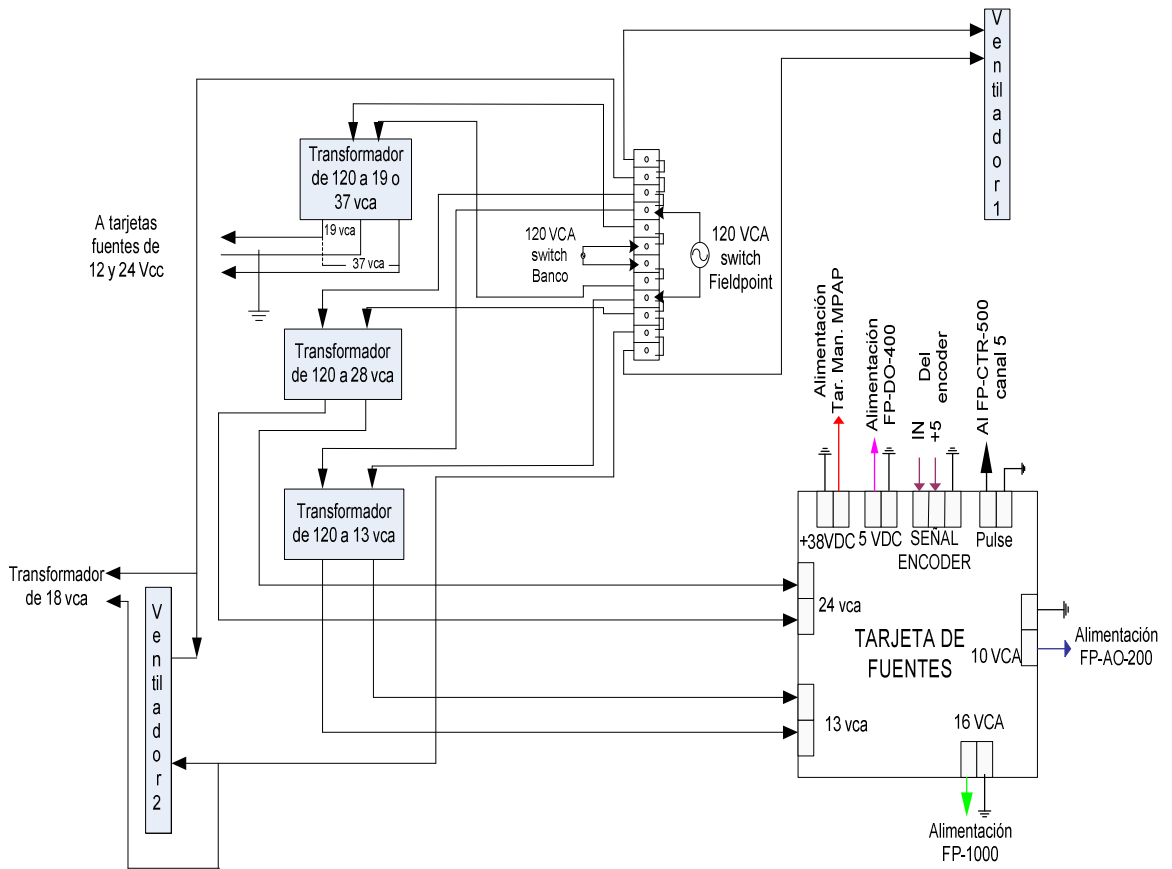
Tipo 1:Discrete Output';
Clase de Rango
Rango[0] LimiteInf:=0;LimiteSup:=1;UndRango:='Boolean'

Anexo 3. PLANOS ELECTRICOS DEL TABLERO DE CONTROL CONTINUO

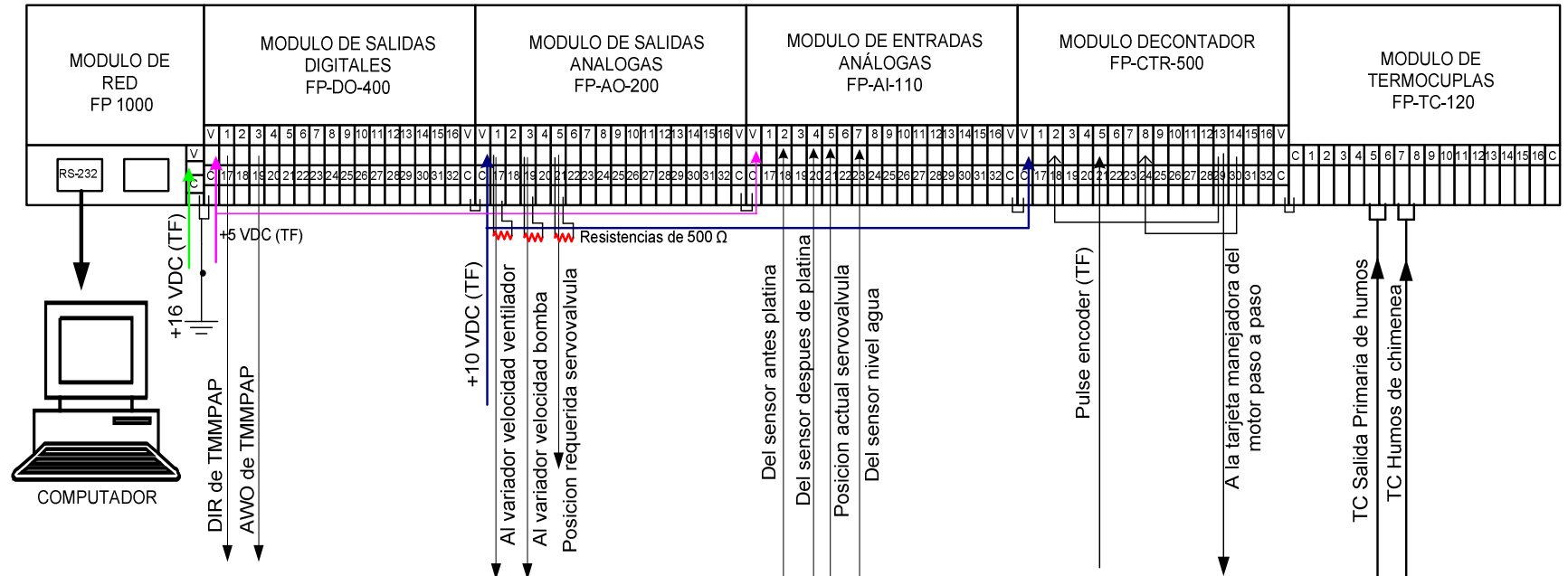
Cofre de potencia tablero de control



Cofre de alimentación de sensores y actuadores de la caldera



Conexiones de los elementos de entrada y salida de la caldera al banco fieldpoint actuales



Planta térmica y sus elementos de control

